



Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg

Rasmussen, Michael R.; Thorndahl, Søren; Grum, Morten ; Neve, Sune; Borup, Morten

Publication date:
2009

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

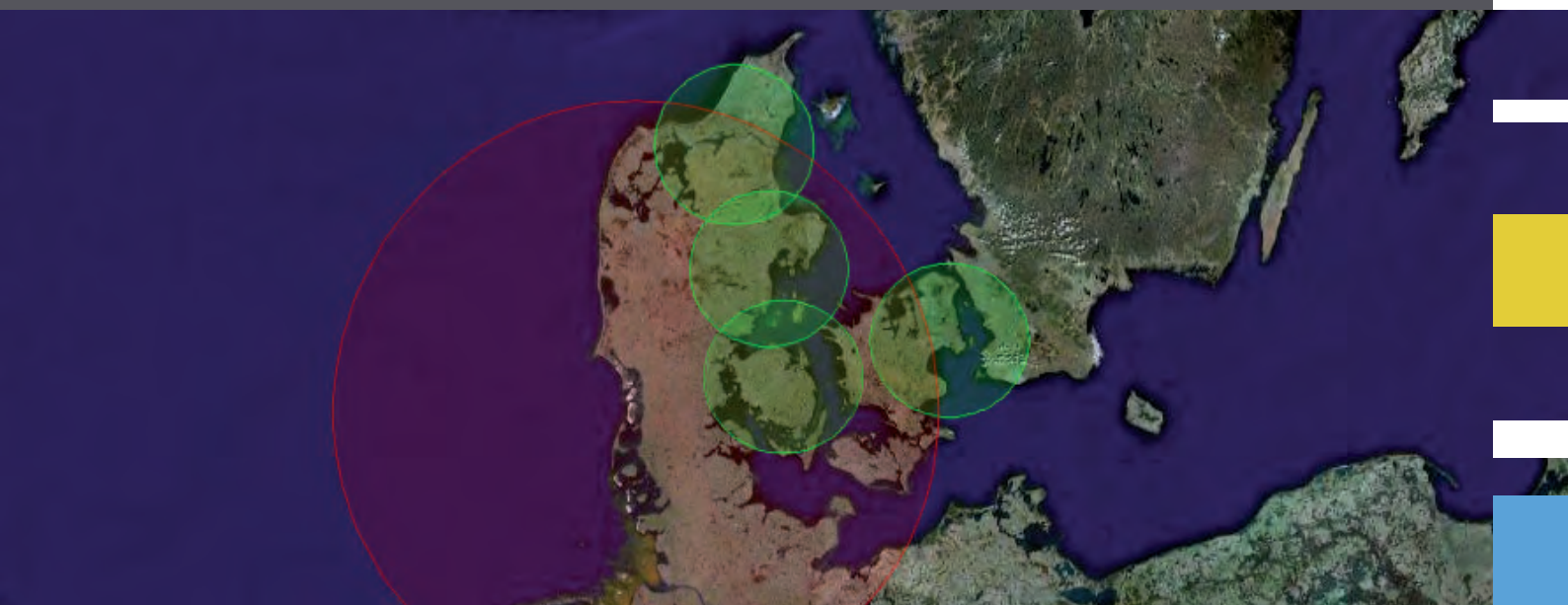
Citation (APA):
Rasmussen, M. R., Thorndahl, S., Grum, M., Neve, S., & Borup, M. (2009). *Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg*. Miljøministeriet, By- og Landskabsstyrelsen.
http://www.naturstyrelsen.dk/Udgivelser/Aarstal/2009/Radarbaseret_spildevandsstyring.htm

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Rapport om
Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg

| | |
|-------------------------------|--|
| Titel: | Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg |
| Resumé: | <p>Projekt har etableret Danmarks første radarbaserede spildevandsprognoser. Det er lykket at prognosticer regn 1-2 timer frem ved brug af radar målingen og yderligere ½-1½ time frem i tiden ved brug af modeller for afløbssystemet.</p> <p>Aflastninger af urensset spildevand forårsaget af ekstreme regnhændelser kan formindskes. Ved at måle nedbør over byer og forudsigelse af tilstrømningen til nøglepunkter i spildevandssystemet muliggøres en bedre styring af afløbssystem og renseanlæg og derigennem reduceres den aflastede mængde.</p> |
| Forfatter: | Michael R. Rasmussen og Søren Thorndahl, Aalborg Universitet, Morten Grum, Sune Neve og Morten Borup Krüger A/S |
| Anden bidragyder: | Aalborg Kommune, Århus Kommune, Vestforsyningen i Holstebro, Odense Vandselskab og Hvidovre Vandforsyning |
| URL: | www.blst.dk |
| Emneord: | Handlingsplan for miljøeffektiv teknologi. Radar styring, regnvand, regn, renseanlæg. |
| ISBN elektronisk: | 978-87-92548-28-3 |
| ISBN trykt: | 978-87-92548-29-0 |
| Ansvarlig institution: | Krüger A/S |
| Udgiver: | By- og Landskabsstyrelsen |
| Udgiverkategori: | Statslig |
| År: | 2009 |
| Sprog: | Dansk |
| Copyright© | Må citeres med kildeangivelse. By- og landskabsstyrelsen, Miljøministeriet |
| Forbehold: | By- og Landsskabsstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter inden for miljøsektoren, finansieret af By- og Landskabsstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for By- og Landskabsstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at By- og Landskabsstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik |

Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg

Forfattere:

Aalborg Universitet

Michael R. Rasmussen

Søren Thorndahl

Krüger A/S

Morten Grum

Sune Neve

Morten Borup



Institut for Byggeri og Anlæg

Sohngaardsholmsvej 57

DK-9000 Aalborg

KRÜGER

Gladsaxevej 363

DK-2860 Søborg

Indhold:

| | |
|---|-----------|
| 1. Forord..... | 2 |
| 2. Sammenfatning og konklusioner..... | 3 |
| 3. Summary and Conclusions | 4 |
| 4. Indledning | 5 |
| 5. Fremgangsmåde og metode | 8 |
| 5.1 Dataflow | 10 |
| 5.2 Radarteknologi..... | 11 |
| 5.2.1 Nedbørsprognose | 15 |
| 5.3 WaterAspects..... | 20 |
| 5.4 Brugergænseflade - vejrradarprognose | 21 |
| 5.5 Brugergænseflade - afstrømningsprognose | 25 |
| 6. Fem cases..... | 28 |
| 6.1 Aalborg..... | 28 |
| 6.1.1 Radaropsætning og resultater..... | 29 |
| 6.1.2 Opbygning af afstrømningsmodel og resultater | 35 |
| 6.1.3 Vurdering og perspektiver | 41 |
| 6.2 Århus..... | 42 |
| 6.2.1 Radaropsætning og resultater..... | 42 |
| 6.3 Opbygning af afstrømningsmodel og resultater | 46 |
| 6.3.1 Vurdering og perspektiver | 54 |
| 6.4 Holstebro..... | 55 |
| 6.4.1 Radaropsætning og resultater..... | 55 |
| 6.4.2 Opbygning af afstrømningsmodel og resultater | 60 |
| 6.4.3 Vurdering og perspektiver | 65 |
| 6.5 Hvidovre | 66 |
| 6.5.1 Radar opsætning og resultater..... | 66 |
| 6.5.2 Vurdering og perspektiver | 74 |
| 6.6 Odense..... | 76 |
| 6.6.1 Radaropsætning og resultater..... | 77 |
| 6.6.2 Opbygning af afstrømningsmodel og resultater | 80 |
| 6.6.3 Vurdering og perspektiver | 87 |
| 7. Perspektiver for konceptet | 88 |
| 8. Konklusion..... | 90 |
| 9. Visioner for fase 2 til radarprojektet..... | 92 |

10. Litteratur 93

1.

Forord

Som et led i implementeringen af regeringens handlingsplan om miljøeffektiv teknologi, blev der i efteråret 2007 under Miljøstyrelsen Virksomhedsordning afsat midler til fremme af miljøeffektiv teknologi. Et af Virksomhedsordningens tre fokusområder var håndteringen af ekstremregn og vandudledning i byer, og under disse rammer blev nærværende projekt blev formet.

Projektet ”**Vejrradarbaseret styring af spildevandsanlæg**”, blev skabt af et konsortium ved hjælp af støtte fra By- og Landskabsstyrelsen og egenfinansiering. Konsortiet består af:

Krüger A/S, Veolia Water
Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg
Aalborg Kommune, Kloakforsyningen
Århus Kommune, Vand og spildevand
Vestforsyning, Holstebro
Odense Vandselskab
Hvidovre Vandforsyning

Med udgangspunkt i aktuelle problemstillinger hos de fem deltagende forsyningsvirksomheder, er der i dette projekt blevet arbejdet med at opsætte et realtidssystem til forudsigelse af nedbør og afstrømning i oplandet. På sigt er det påtænkt at realtidssystemet kan indbygges i styringsstrategier med henblik på at reducere aflastninger til recipienterne, samt at sikre en optimal rensning af spildevandet.

Krüger A/S har i projektet haft ansvar for projektledelsen og arbejdet med afstrømningsprognosen. Aalborg Universitet har været ansvarlig for radar prognose/teknologi, mens forsyningsselskaberne har defineret de aktuelle problemstillinger og været behjælpelig med opstilling af datagrundlaget.

Teknologien som er udviklet under dette projekt må betragtes som banebrydende inden for spildevandsbranchen i Danmark, og kan forhåbentlig i løbet af kort tid være med til at støtte op om en forbedret håndtering af afstrømning forårsaget af ekstremregn.

Projektet er forløbet i perioden 1. januar 2008 til 16. december 2008.

2. Sammenfatning og konklusioner

Aflastninger af urensset spildevand forårsaget af ekstreme regnhændelser med en kraftig påvirkning af vandmiljøet til følge kan formindskes. Dette kan ske ved udbygning af afløbssystem og spildevandsanlæg og/eller ved at optimere driften af de eksisterende systemer. Ved at måle den stedslige fordelte nedbør over byen og bruge denne viden til at lave en forudsigelse af tilstrømningen til nøglepunkter i spildevandssystemet muliggøres en bedre styring af afløbssystem og renseanlæg og derigennem reduceres den aflastede mængde.

Projektet har etableret Danmarks første radarbaserede spildevandsprognoser. Der er i projektet opstillet en radarbaseret prognose for flow og/eller niveau ved et punkt i afløbssystemet i fem forskellige byer. Det er lykkedes at prognosticere regn 1-2 timer frem ved brug af radar målingen og at prognosticere niveau og/eller flow en yderligere $\frac{1}{2}$ -1 $\frac{1}{2}$ time frem i tiden ved brug af modeller for afløbssystemet. Projektet er i stor udstrækning gennemført ved sammenkobling af eksisterende teknologier. I fire af fem casestudier (Aalborg, Århus, Odense og Hvidovre) benyttes realtidsdata fra lokale vejrradarer (af DHI typen), mens der i den femte case (Holstebro) er benyttet historiske data fra DMI radaren på Rønmø.

Radar baserede prognoser i spildevandssystemer har et stort potentiale i forhold til en optimeret udnyttelse af både afløbssystem og renseanlæg. Ved udnyttelse af potentialet opnås miljømæssige forbedringer af vandkvalitet på en økonomisk fordelagtig måde.

Projektets hjemmeside findes på adressen www.regnradar.dk hvor der også er links til siderne med de prognoser der er opstillet under projektet:

- radar prognoserne: www.vejrradar.dk
- flow og niveau prognoserne: <http://star2.dk:24001>.

3. Summary and Conclusions

Discharge of untreated sewerage due to extreme rainfall event leading to environmental pollution can be reduced. This can be done by expanding the sewerage and treatment facilities and/or by optimizing the exploitation of the existing infrastructure. By measuring and forecasting the spatial distribution rainfall over an urban catchment it is possible to forecast flow at key points within the wastewater system and thereby improve the real time operation of the sewerage and wastewater treatment system, and thus reduce the discharged amounts.

The project has established Denmark's first radar based forecast for flow and/or water level at a point in the sewerage system for five different cities/towns. Rainfall has successfully been forecasted 1-2 hours and flow/levels have been forecasted an additional ½-1½ hours using models describing the sewerage system runoff behavior. The project has to a large extent been carried out by coupling existing technologies. In four of the five the case studies (Aalborg, Århus, Odense and Hvidovre) real time data from local weather radars (DHI type) have been used whereas historic data from the Danish Metrological Office (DMI) radar in Rømø was used in the fifth case study (Holstebro).

Radar based forecasts in the wastewater sector has a large potential in the context of optimized exploitation of both sewerage systems and wastewater treatment plants. Exploitation of this potential leads to improvements in the environmental water quality in a highly cost effective manner.

The projects web page can be found at www.regnradar.dk where links can be found to the dynamic forecast web pages setup during the project:

- Animated radar forecasts: www.vejrradar.dk
- Flow and level forecasts: <http://star2.dk:24001>.

4.

Indledning

Baggrund

2006/2007 har været et meteorologisk rekordår, hvor mange dele af landet har oplevet store oversvømmelser som følge af ekstremregn. I sommeren 2006 oplevede Aalborg-området to meget kraftige regnhændelser. Den 20/1 2007 oplevede Midt- og Sønderjylland samt Fyn og Sjælland udbredte oversvømmelser som følge af ekstremregn. Således stod hele Vejle Centrum under vand. Senest oplevede Sjælland den 11/8 2007 regnintensiteter, der ikke var målt større de sidste 20 år noget sted i Danmark.

Selvom de konkrete hændelser ikke statistisk kan kobles direkte til klimaændringer er det et bekymrende billede af hvordan den nære fremtid vil se ud. Med forudsigelser fra de fleste klimamodeller om, at vi vil opleve kraftigere ekstrem regn om sommeren er det klart at der skal udvikles strategier for at imødekomme de skadevoldende hændelser.

Med de ekstreme hændelser i 2006/2007 er der kommet øget opmærksomhed på den ekstreme nedbør og at den efterfølgende afstrømning er et reelt problem i vore byer. Denne ekstra opmærksomhed lægger naturligt et pres fra befolkningen på kommunerne om at sikre at gentagelsesperioden for skadevoldende hændelser gøres længere.

Krüger og Aalborg Universitet er centrale partnere bag et større projekt, Storm- and Wastewater Informatics (SWI), under det strategiske forskningsråd, omhandlende styring af afløbssystemer ved hjælp af bla. vejrradar. Fokus i SWI projektet er forskning i nye metoder til optimering af driften af eksisterende spildevandssystemer. Dette projekt adskiller sig fra SWI projektet ved at være målrettet mod udvikling af ny teknologi ved udnyttelse af eksisterende viden og sammenkobling af eksisterende teknologier og er langt mindre grad et forskningsprojekt. Ligeledes vil der først komme resultater fra SWI projektet i løbet af de næste 5 år. Dette projekt støtter derfor op om igangværende arbejde og kunne fungere som teknologikatalysator inden for dette vigtige område.

I dette projekt, som baserer sig på eksisterende viden, er universiteter, rådgivere, vandselskaber og forsyningsvirksomheder gået sammen om at udvikle fremtidens regnstyringssystemer for afløbssystem og spildevandsanlæg. Fokus har været at udnytte den viden der er om måling og forudsigelse af regn ved hjælp af vejrradarer til at forbygge skadevoldende hændelser på ejendom, sundhed og miljø.

Problemstilling

Ved ekstreme regnhændelser bliver renseanlægget overbelastet. Konsekvenserne kan i mange tilfælde være kraftig påvirkning af vandmiljøet i form af overløb af urensset spildevand. Dette kan imødekommes ved at kapaciteten udvides gennem udbygning af spildevandsanlæg eller ved at optimere driften af de eksisterende systemer. I mange situationer er en optimering af systemet at foretrække frem for kostbar og besværlig anlægsudvidelse.

Afløbssystemer og renseanlæg er altid dimensioneret til en given maksimal hydraulisk belastning. Under ekstreme regn med gentagelsesperioder større end de dimensionsgivende gentagelsesperioder, overskrides denne kapacitet. I disse situationer står valget mellem at lede mere vand igennem renseanlægget med risiko for at forringe næringssaltfjernelse og slamflugt eller at aflaste direkte til recipienten med risiko for forringelse af vandmiljø og badevandskvalitet.

De væsentligste problemer forbundet med en hydraulisk overbelastning af afløbssystemer og renseanlæg er:

- Aflastning direkte til recipient der føre til:
 - Forringelse af vandmiljø i både nær- og fjernrecipienter
 - Forurening af badevand
- Slamflugt fra efterklaringstanke på renseanlæg med efterfølgende forringet rensekapacitet
- Reduceret næringssaltfjernelse

Ved at måle den stedslige fordelte nedbør og prognosticere denne over byen kan der laves en forudsigelse af tilstrømningen til nøglepunkter i afløbssystemet og/eller til renseanlægget. Herved vil bliver det meget nemmere at optimere styringen af afløbssystemet og forbedre kapaciteten af renseanlægget uden at skulle udbygge de fysiske anlæg. Det giver en langt mere fleksibel løsning på kapacitetsproblemet.

Målgruppe

Målgruppen for dette projekt er typisk forsyningsvirksomheder og vandselskaber. De har det direkte ansvar for at vores afløbssystemer og renseanlæg fungerer tilfredsstillende. Der er derfor i dette projekt lagt vægt på at involvere forsynings-virksomheder direkte i arbejdet, for at opnå en så god anvendelse af den nye viden som muligt.

Danmark ligger også i front med udvikling af X-båndsbaseerede lokale vejrradarer og det er nærliggende at forestille sig at dette projekt vil understøtte behovet for flere lokale vejrradarer både i Danmark og i udlandet. Projekter som dette vil derfor bringe dansk kompetence inden for områderne omkring vejrradarstyrede miljøteknologi frem.

I gruppen af forsyningsvirksomheder der har støttet og deltaget i dette projekt, har fire nu etableret lokale vejrradarer og én har valgt at afprøve brugen af data fra en af de landsdækkende DMI radar.

5.

Fremgangsmåde og metode

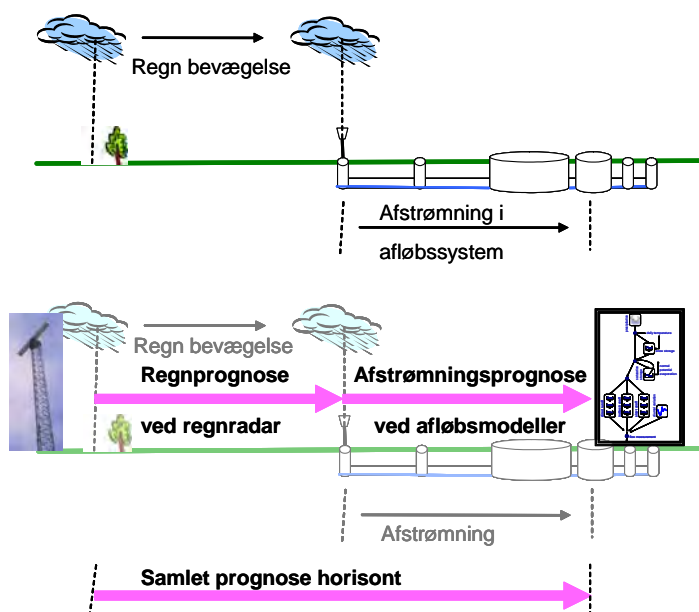
Målet med nærværende projekt er at opbygge et varslingsystem til afløbssystemer og renseanlæg, der udnytter potentialet i vejrradartechnologi til at forbedre drift og kvalitet af spildevandssystemet.

Systemet består af følgende to hovedelementer:

- prognoseværktøj til regn ved brug af radar
- afstrømningsmodel til fremskrivning af den prognosticerede regn

Forudsætningen for en ubemandet realtidsstyring af f.eks. renseanlæg er at systemet er enkelt, hurtigt og robust. Måling af nedbør med vejrradar genererer store mængder af data. Udfordringen er at omsætte disse komplekse og varierende regnmønstre til information som kan bruges til styring.

Regnprognosen baserer sig på nedbørsmålinger foretaget med en lokal vejrradar af LAWR- typen (Local Area Weather Radar) for Århus, Odense, Hvidovre og Aalborgs vedkomne. Radarerne er placeret i nærheden af de aktuelle oplande. For Holstebros vedkomne anvendes DMI's radar på Rørmø. Radarmålingen danner baggrund for en prognose for regnens udbredelse og intensitet op til 1-2 timer frem i tiden. Prognosen skal være i stand til at tage hensyn til de forskellige vejrtyper som er typiske i Danmark. På baggrund af vejrradar målinger genereres kontinuert et usikkerhedsestimat til den videre bearbejdning.



Figur 5.1.a.

Illustration af den samlede prognose horisont bestående af prognose af regnen med radar og prognose af afstrømningsforløbet.

Prognostisering af tilløbet til et punkt i afløbssystemet som for eksempel et bassin eller renseanlæg kræver en omsætning af nedbør til afstrømning, hvor der tages højde for arealfordeling, forsinkelser, overløb, spjæld og pumper i afløbssystemet. Afstrømningsprocessen beskrives gennem en afstrømningsmodel der på en enkel og robust måde beregner regnvandsafstrømningen fra overflader og ledningsnet til renseanlægget. Ved denne fremgangsmåde opnås en håndtering af effekterne af den stedlige varierende nedbør uden brug af detaljeret hydrodynamisk modellering. Fordele ved denne fremgangsmåde er en robust og hurtig metode, som er velegnet til realtidsstyring. Modellerne opstilles på grundlag af oplandsbeskrivelse og ledningsnet, og kalibreres løbende mod målinger i afløbssystemet. Modellen modtager kontinuerligt et nedbørsinput fra ovennævnte nedbørsprognose og opdaterer dermed tilløbsprognosen til renseanlægget eller tilsvarende punkt i afløbssystemet.

I afløbssystemet kan en prognose af tilløbet til forskellige punkter i afløbssystemet for eksempel benyttes aktivt til at styre tømning fra bassiner. Ofte, som for eksempel i Odense, er der endda mulighed for at fordele udpumpning og afstrømning mellem forskellige renseanlæg. Prognoserne for flow til forskellige punkter i afløbssystemet giver mulighed for optimeret forberedelse af bassiner til kommende afstrømning og en optimal belastning af afløbssystemets renseanlæg.

Ud fra tilløbsprognosen får det pågældende styresystem på renseanlægget information om forventet variation i den fremtidige hydrauliske belastning under regnhændelsen. Disse informationer anvendes aktivt i form af en online styring på renseanlægget som er specifikt designet til håndtering af regnhændelser. En særlig problemstilling er hvornår regnstyringen skal aktiveres og afsluttes. Ved at have en prognose på tilstrømningen er det muligt at udnytte renskapaciteten fuldt ud under hele hændelsen og dermed reducere miljøpåvirkningen af recipienten. Ligeledes mindskes slamflugt fra efterklaringstanken, som er specielt problematiske under ekstreme og uvarslede regnhændelser. Slamflugt kan foruden en akut miljøpåvirkning også resultere i reduceret udløbskvalitet fra renseanlægget i en periode efter hændelsen.

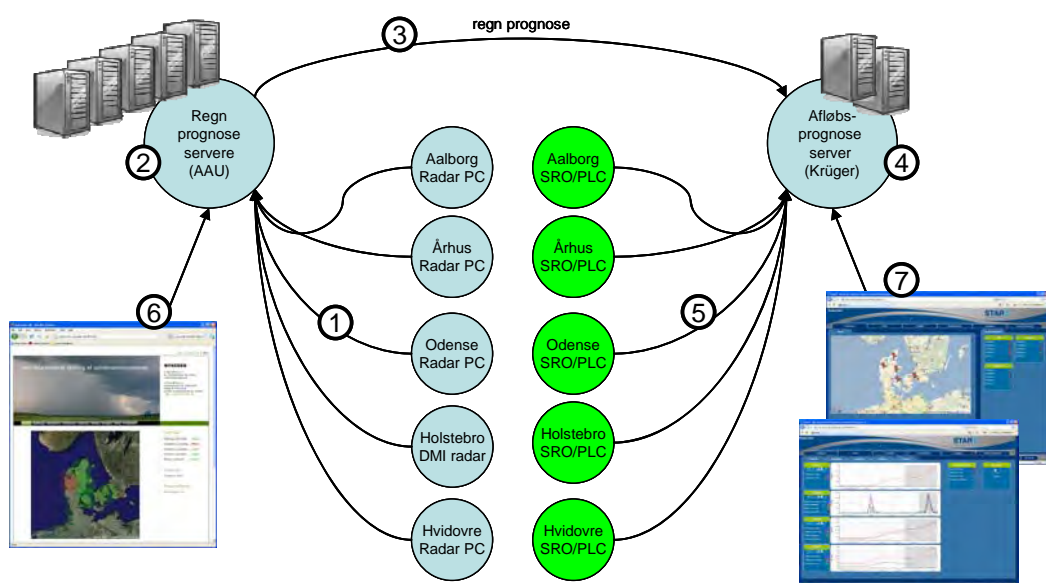
For renseanlæg som i dag ikke anvender regnstyring er det potentielt muligt at forøge den hydrauliske kapacitet med 40 % i gennemsnit. Det anslås at den foreslåede aktive styring med prognosticerede vejrradardata kan forøge denne kapacitet med yderligere 10-15 %. Dette kan reducere behovet for anlægsudvidelser på renseanlægget eller etableringer af forsinkelsesbassiner i oplandet. Gevinsten på styring af afløbssystemer er noget svære at fastlægge men vil typisk ligge på en 0-50 % reduktion i aflastede volumener.

5.1

Dataflow

Figur 5.1.a viser en skematisk illustration af dataflowet fra radarerne til prognosen i spildevandssystemet. Flowet består af følgende trin (nummeret som i figuren):

1. Radardata indhentes hvert 5. minut via ftp enten direkte eller indirekte fra hver af de lokale vejrradarer.
2. Hos AAU benyttes de seneste radardata til hvert 5. minut at beregne en prognose for regnintensiteten.
3. Hos AAU omregnes prognosen til middelintensiteter for de enkelte deloplande i hvert casestudie og disse prognoser overføres via internettet til server i Krüger, Søborg, hvert 5. minut.
4. På serveren i Krüger foretages en simulering af afstrømningen ved brug af de prognosticerede regnserier for regn over de enkelte deloplande. Dette sker hvert andet minut idet denne server er baseret på en videreudvikling af STAR2 teknologien der opererer med 2 minutters tidsskridt.
5. Udvalgte måle- og driftsdata fra spildevandssystemernes SRO system er eksporteres løbende over Internettet til serveren placeret i Krüger, Søborg. Denne overførelse er afprøvet for alle fire casestudier med realtids prognoser, men det er endnu ikke lykket at sætte denne del af systemet i kontinuert drift pga. komplikationer i parallelt udviklingsarbejde på serveren.
6. Der er etableret en åben web side til løbende visning af både målt og prognosticeret radarnedbør for hver casestudie. Adressen er: www.vejrradar.dk
7. Der er ligeledes etableret en åben web side til løbende visning af radar baseret prognose af flow/niveau i afløbssystemet eller ved tilføjet til renseanlægget. Adressen er: <http://star2.dk:24001>.



Figur 5.1.a
Skematisk illustration af dataflow fra radar til prognose i spildevandssystem.
Se beskrivelse i teksten.

5.2

Radarteknologi

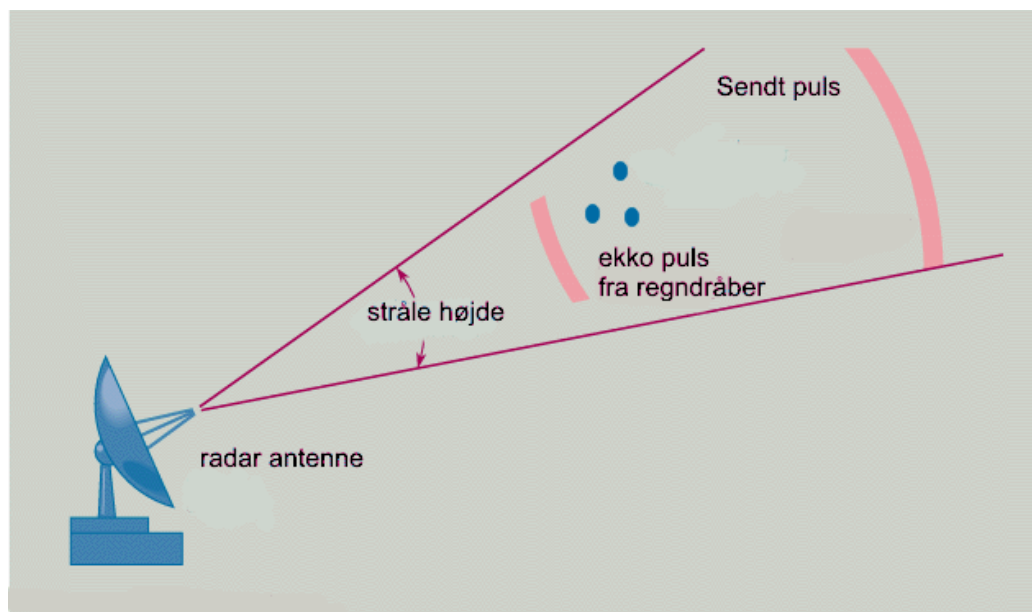
Oprindelse af vejrradar

Nedbør måles traditionelt med vippekar regnmålere. Disse er en international standard for nedbørsregistrering. Den ingeniørmæssige praksis i afløbsteknikken er derfor i stort omfang blevet baseret på denne type regnmåler og en tilhørende antagelse om at disse er repræsentative for et større areal. Vejrradar blev som meteorologisk måleinstrument anvendt i slutningen af 40'erne. Opdagelsen under anden verdenskrig var at nedbør forhindrede radaren i at se skibe og fly. Dette forhold blev senere brugt til at studere hvordan regn dæmper radarsignalet gennem atmosfæren. Det var derfor ikke langt til at bruge denne teknologi til at studere hvor meget nedbør der er i atmosfæren og dermed også hvor meget det regnede. Siden 1980'erne er vejrradar blevet standard inden for de meteorologiske tjenester. De sidste 10 år er anvendelse af vejrradar inden for afløbsteknikken været genstand for stigende interesse inden for forskningen (Einfalt et al, 2004).

Teknikken bag vejrradar

Skønt der i dag findes mange forskellige typer af vejrradar er de grundlæggende principper stadig de samme. Radaren udsender gennem en retningsspecifik antenne en meget kortvarig puls af elektromagnetisk stråling, figur 5.2.a. Når pulsen rammer regndråber vil noget af strålingen blive reflekteret tilbage mod radaren. Ved at måle hvor lang tid der går fra at pulsen er afsendt til at ekkoet kommer tilbage kan man beregne afstanden ud til regnskyen. Da antennes retning også registreres er det dermed mulig at bestemme den præcise position hvor det regner. Når styrken af ekkoet og-

så måles kan man estimere hvor mange dråber der er inden for målevolumenet. Da radar antennen har begrænset vinkelåbning vil det volumen der måles over blive større des længere væk det er fra radaren. Derfor betyder antennens vinkelåbning meget for hvor fin en opløsning der kan måles i.

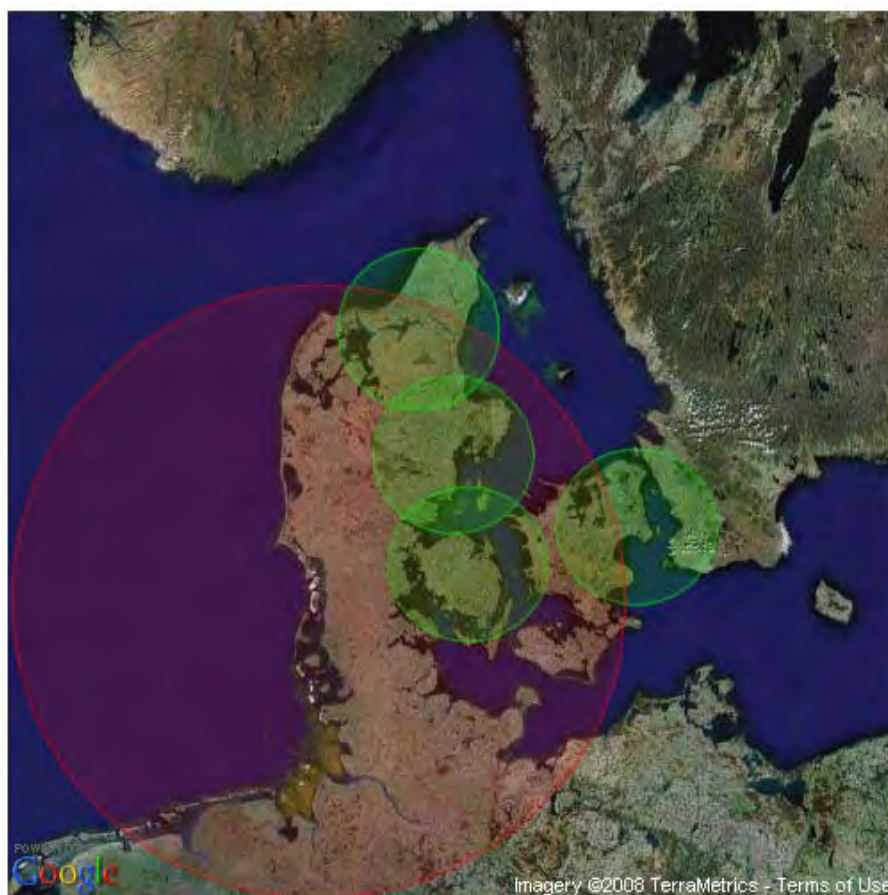


Figur 5.2.a
Princip ved måling af nedbør med radar, (figur modificeret fra Encyclopedia Britannica, 1994).

I dette projekt anvendes en kombination af X-bånd og C-bånds radarer. C-bånd bruges typisk af de større meteorologiske radarer (som f.eks. DMI), mens X-bånd er blevet populært til de mindre og billigere lokale radarer. X-bånd kan måle med høj geografisk opløsning, men er udsat for kraftig dæmpning gennem regnen. C-bånd er kun påvirket at regn i mindre grad – til gengæld er den geografiske opløsning mindre. Under alle omstændigheder skal begge typer af radar justeres i mod kendt nedbør, f.eks. målt af vippekars regnmålere. Der er også forskel i måleperioden mellem de to typer af radarer. C-bånds radaren anvendt i dette projekt tager et øjeblikksbillede hvert 10. minut, men X-bånds radaren typisk midler målingen over 5 minutter

Radar dækningsområde

Der indgår 5 radarer i dette projekt. Deres indbyrdes placering og maksimale rækkevidde er vist på figur 5.2.b. De lokale radarer er angivet med grønt og cirkelens radius visere deres maksimale rækkevidde på 60 km. Den røde cirkel er DMI's radar på Rømø og cirkelens radius angiver den operationelle rækkevidde på 240 km. Den maksimale rækkevidde for god kvantitativ måling af nedbøren er i praksis 15 km for de lokaleradarer og 75 km for DMI's radarer.



Figur 5.2.b

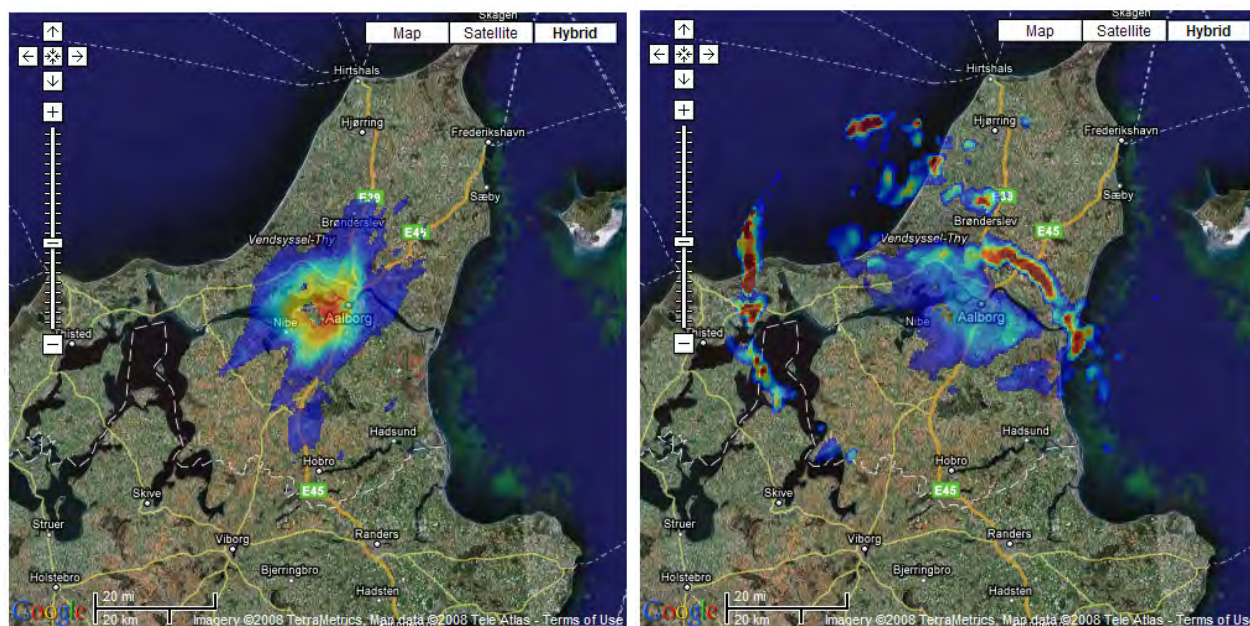
Placering og maksimal rækkevidde af de anvendte radarer grønne cirkler er X-bånds radar ejet af forsyningerne og den røde cirkel er C-bånds radaren ejet af DMI.

Det er af betydning for radarforudsigelsernes kvalitet hvor langt væk fra radarmålingerne kan antages at være præcise. Hvis regnen f.eks. bevæger sig med 10 m/s, vil de 15 km rækkevidde have passeret radaren på 25 minutter. For forudsigelser længere frem end 25 minutter er data således baseret på mindre nøjagtige målinger. De to systemer opererer med forskellig stedlig opløsning. De lokale radarer opererer med en opløsning på 500 x 500 meter. Mens DMI's radar opererer med en opløsning på 2000 x 2000 meter. Ud over forskellen i opløsning, er antennedesignet også væsentlig forskellig, figur 5.2.c. DMI's radar benytter sig af en parabol med en symmetrisk stråle på 1° åbning. De lokale radarer benytter sig af en asymmetrisk antenne hvor den horisontale åbningsvinkel er 1°, mens den vertikale åbningsvinkel er +/- 10°. Det betyder for de lokale radarer at den øverste del af strålen bryder ud af skydækket relativt tæt på radaren. For konvektive regnskyer (tordenbyger) med en skyhøjde op til 10 km er dette uden betydning. Men for lavthængende stratiforme regnskyer kan det betyde at målingen ikke er optimal.



Figur 5.2.c
Eksempel på C-båndsradar (Sindal) med parabol antenne og X-båndsradar (Aalborg) med slotted array antenne.

Det er for figur 5.2.d klart at i perioder med lavthængende skyer der giver en fin regn, kan det være vanskeligt at måle med stor præcision, mens perioder med kraftige byger er bedre bestemt med den lokale radars anten- nededsign.



Figur 5.2.d
Eksempel på vejr situation, hvor skyhøjden er lav og tæt på jorden (stratiform) og en vejr situation hvor sky højden er høj og bygepræget (konvektiv).

Dette præger naturligt den kvalitet der er mulig at forvente for prognosemo- dellens i perioder med lavthængende stratiform regn. Det er en problemstil- ling, der kræver yderlig forskning og udvikling for at løse. På den mere po- sitive side er det sjældent de lavt hængende regnsystemer der giver anled- ning til problemer i afløbssystemerne i praksis.

5.2.1

Nedbørsprognose

Nærværende projekt er gennemført med to forskellige prognosemodeller for nedbøren. Den første *Global Vector (GV)* er anvendt i startfasen af projektet. Primært for at opsætte og teste hele data-infrastrukturen, dvs. import af data fra de enkelte radarer, lagring af data, processering af data og eksport af data til afstrømningsmodellen hos Krüger. Efter denne infrastruktur faldt på plads, blev den anden metode *CO-TREC* implementeret on-line i november 2008, således er størstedelen af de prognoser der er sendt til Krügers afstrømningssystem baseret på GV.

Global Vector (GV)

I denne model bestemmes en global vektor (se figur 6.2.1.b) ud fra den maksimale korrelation mellem to på hinanden følgende radarbilleder. Korrelationen $\gamma(x,y)$ bestemmes ud fra følgende formel, hvor $O(x,y)$ angiver en observeret radarpixel. Index 1 og 2 angiver to på hinanden følgende radarbilleder (Van Horne 2003):

$$\gamma(x,y) = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O_1(x,y) - \overline{O_1}) \cdot (O_2(x-n, y-m) - \overline{O_2})}{\sqrt{\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O_1(x,y) - \overline{O_1}) \right)^2 \cdot \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O_2(x-n, y-m) - \overline{O_2}) \right)^2}}$$

hvor n og m er forskydningen af et antal pixels og stegen O'erne over indikerer middelværdier

Det seneste radarbillede kan når den globale vektor er fundet ekstrapoleres lineært (linear forward advection) et antal tidsskridt ud i fremtiden. Modellen er derfor udelukkende en parallelforskydning af det oprindelige radarbillede.

GV-modellen er ikke anset for særlig pålidelig, da den ikke tager højde for forskellige strømningshastigheder og rotationer i nedbørsfeltet. Desuden er modellen meget påvirkelig overfor støj i billederne (clutter), da disse vil påvirke den maksimale korrelation mellem to radarbilleder. Hvilket i nogle tilfælde fører til at den globale vektor ikke kan bestemmes eller at denne får en urealistisk størrelse eller retning. For i nogen grad at reducere denne usikkerhed er der indført en tærskelværdi, således at de laveste værdier frasorteres inden korrelationsberegningen.

CO-TREC

CO-TREC-modellen (Continuous-TREC, Mechlenburg 2000; Li et al 1995) er baseret på den såkaldte TREC-model, *Tracking of Radar Echoes with Correlation*, Rinehart og Garvey (1978) og Li et al. (1995). Den baserer sig

også på korrelationen mellem radarbilleder, men i modsætning til GV-modellen deles radarbilledet op i mindre områder og korrelationen findes for hvert delområde radarbillederne imellem. Det er hermed muligt at finde et vektorfelt for nedbørens bevægelse, når ovenstående formel anvendes på mindre områder.

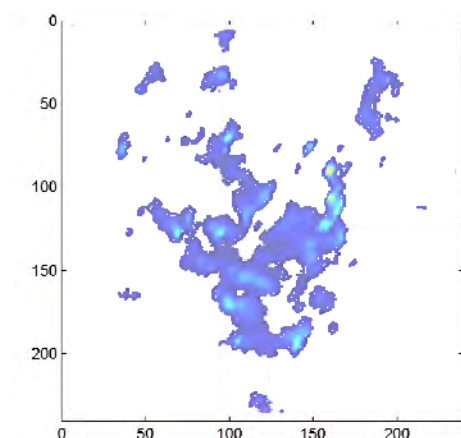
Inden det lokale vektorfelt findes foretages en udglatning (glidende gennemsnit) af radarbillederne, således det værste støj midles ud. Liu (2008) har for X-bånds-radardata eksperimenteret med flere forskellige typer udglatning (*smoothing*) af radarbillederne og fundet en optimal størrelse af den boksstørrelse hvori udglatningen foretages. Som det kan ses i eksemplet på figur 6.2.1.c kan de lokale TREC-vektorer, på trods af udglatningen, være behæftet med en del støj, dels på grund af eventuel støj mellem radarbillederne, og dels da der i periferien af radarbilledernes udbredelse kan være observeret nedbør i et billede, men måske ikke i det næste. Derfor implementeres CO-TREC-modellen (figur 6.2.1.d), som ensretter de lokale vektorer ved at minimere følgende funktion (Li et al 1995):

$$J(u, v) = \int \left((u(x, y) - u_0(x, y))^2 + (v(x, y) - v_0(x, y))^2 \right) dx dy$$

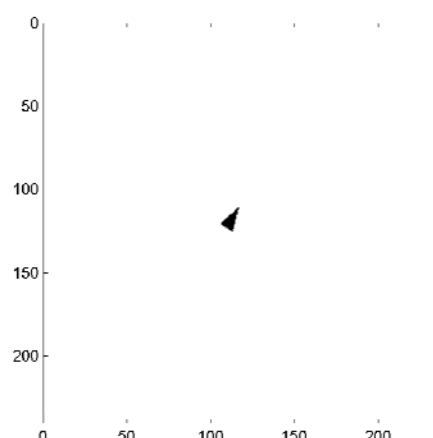
Hvor $u_0(x, y)$ og $v_0(x, y)$ er de bestemte TREC-hastigheder i begge retninger og $u(x, y)$ og $v(x, y)$ er CO-TREC-hastighederne. Desuden sikres kontinuitet i bevægelsesfeltet ved at sikre at følgende funktion er overholdt (Li et al 1995):

$$\frac{\partial u(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} = 0$$

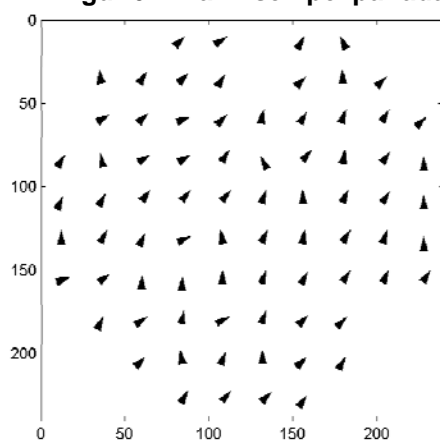
Liu (2008) har ligeledes analyseret en lang række nedbørshændelser og fundet et optimalt parametersæt for dette ensretningsinterval. Ud fra det fundne CO-TREC-vektorfelt ekstrapoleres radarbillederne ved hjælp af en såkaldt linear backward advection metode, som fungerer ved at første tidskridt i prognosen genereres ved at ekstrapolere det seneste radarbillede med CO-TREC-vektorfeltet. Andet tidsskridt ekstrapoleres så det genererede billede med vektorfeltet, og sådan fortsættes prognosen i et specificeret antal tidsskridt.



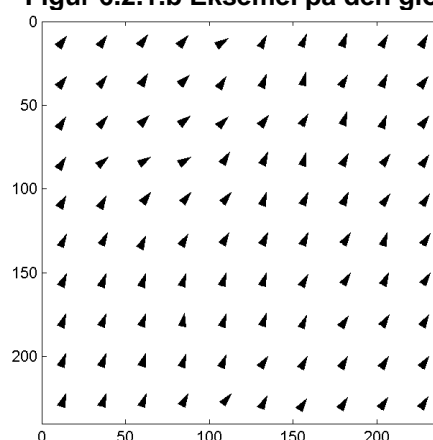
Figur 6.2.1.a Eksempel på radarbillede



Figur 6.2.1.b Eksempel på den globale vektor



Figur 6.2.1.c Eksempel på TREC-vektorer



Figur 6.2.1.e Eksempel på CO-TREC-vektorer

Der er i de to prognosemodeller ikke implementeret udvikling/henfald af nedbøren, hvilket vil sige at nedbørsfeltet kun flyttes advektivt i prognosen, men intensiteterne ændres ikke. Dette kan være et problem i konvektive nedbørshændelser hvor nedbøren udvikles og henfalder hurtigt.

Evalueringsmål

I prognoser for nedbør baseret på radardata er det vigtigt af have nogle repræsentative mål for hvor godt prognosen præsterer i forhold til observationerne. Der findes en helt række af forskellige typer af sammenhængsmål anvendt indenfor meteorologien og radarteknologien, og i dette projekt er der valgt tre mål som repræsenterer tre forskellige situationer. Det er både interessant at vide hvor god sammenhængen mellem observationer og prognosemodel er overordnet for hele radarens udbredelsesområde, men også i forhold til de maksimale værdier.

CSI (Critical Success Index)

Dette indeks beskriver hvor god prognosemodellen er til at prædiktere regn i de enkelte radarpixels ud fra nedenstående skema (Van Horne 2003):

| | | Prognose | |
|-------------|------|------------------|----------|
| | Regn | Ja | Nej |
| | Ja | Hit (H) | Miss (M) |
| Observation | Nej | False Alarm (FA) | Null (N) |

CSI værdien kan herefter beregnes ved at summere op over hele radarbilledet:

$$CSI = \frac{\sum H}{\sum H + \sum M + \sum FA}$$

En perfekt prognose vil resultere i en CSI-værdi på 1 og er der ingen sammenhæng mellem prognose og observationer er CSI lig med 0. Dette indeks undersøger ikke om de enkelte prædikterede intensiteter svarer det de observerede, men udelukkende om der har været prædikeret regn eller ej.

Korrelationskoefficienten (R^2)

Som evalueringsmål for de prognosticerede (P) og observerede (O) regnintensiteter anvendes den todimensionale korrelationskoefficient R^2 :

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O(x, y) - \bar{O}) \cdot (P(x, y) - \bar{P})}{\sqrt{\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O(x, y) - \bar{O}) \right)^2 \cdot \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (P(x, y) - \bar{P}) \right)^2}} \right)^2$$

Modsat CSI siger R^2 noget om hvor godt de enkelte regnintensiteter korrelerer når man ser på hele radarens udbredelsesområde. En perfekt prognose vil resultere i en R^2 -værdi på 1 og er der ingen sammenhæng mellem prognose og observationer er R^2 lig med 0.

Den maksimale korrelationskoefficient (c_{\max})

Modsat CSI og R^2 som angiver værdier for sammenhængen mellem observationer og prognose for hele den prognosticerede flade, beskriver den maksimale korrelationskoefficient (c_{\max}) den største korrelation mellem prognose og observationer i et punkt, nemlig der hvor korrelationen er størst:

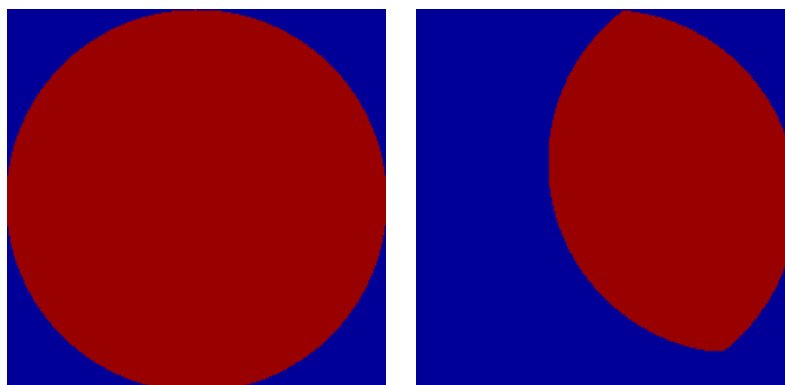
$$\gamma(x, y) = \frac{\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O(x, y) - \bar{O}) \cdot (P(x - n, y - m) - \bar{P})}{\sqrt{\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (O(x, y) - \bar{O}) \right)^2 \cdot \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (P(x - n, y - m) - \bar{P}) \right)^2}}$$

$$c_{max} = \max(\gamma)$$

Faktisk er det samme funktion som anvendes til at finde den globale vektor. Som i de to andre mål svarer en værdi på 1 til den bedste korrelation og 0 til ingen korrelation.

Maskering

Når evalueringsmålene beregnes er det vigtigt, at man kun sammenligner de områder hvori der reelt er data der kan sammenlignes. Man kan for eksempel forestille sig, at der i de observerede data vil være nyt nedbør kommet ind i radarbilledet, som af gode grunde ikke er at finde i prognosen. Derfor er der implementeret en maske, som afgrænser det område, hvori de tre evalueringsmål beregnes. Denne maske flyttes advektivt i hvert tidskridt med den globale vektor i begge prognosemetoder (Figur 5.2.1.f)



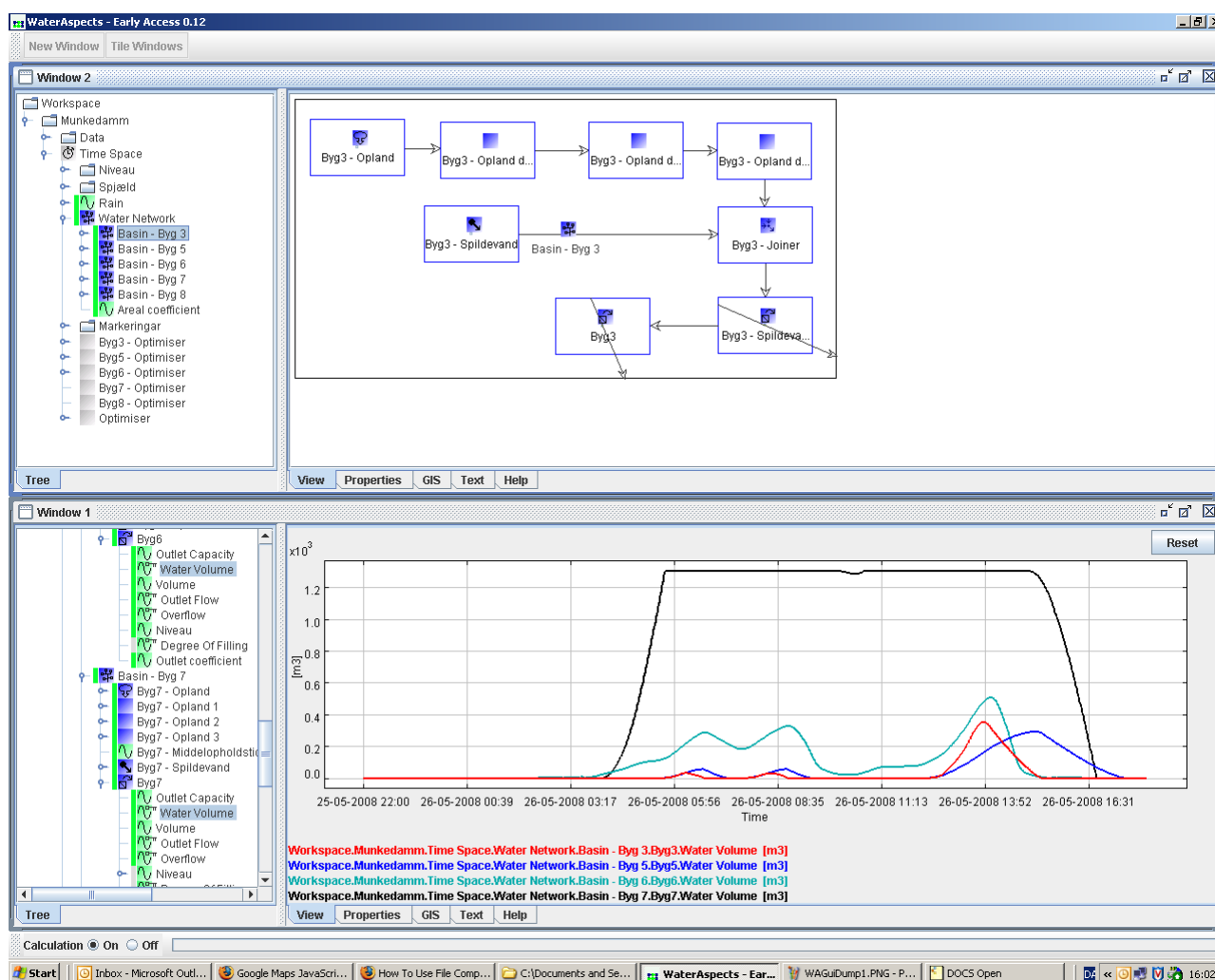
Figur 5.2.1.f.

Tv. oprindelig maske (rød) som afgrænser radarens udbredelse. Th. maske flyttet et antal tidsskridt med den globale vektor. I det røde område beregnes evalueringsmålene.

5.3

WaterAspects

Prognosemodellerne er opbygget i WaterAspects®, et fleksibelt komponentbaseret modelleringsværktøj med mulighed for at foretage prognoseberegninger i realtid og med indbygget optimeringsrutine til kalibrering overfor måledata. Brugerens af programmet har i høj grad selv mulighed for at vælge kompleksitet og detaljeringsgraden af den opbyggede model.

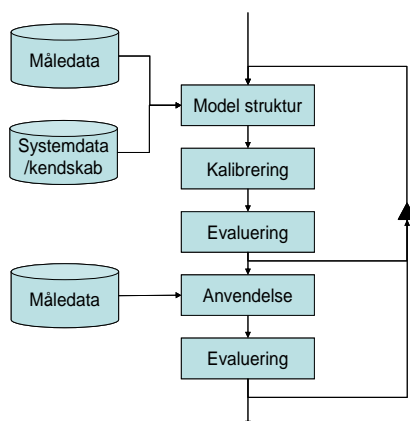


Figur 5.3.a

Visning af WaterAspects bruger grænsefladen der er benyttet til opbygning og kalibrering af afstrømningsmodellerne for hver case studie.

Fremgangsmåden ved opbygning af modellerne er illustreret i figuren nedenfor. Med udgangspunkt i afløbssystemets hovedstruktur opstilles en forenklet model for afløbssystemet. Sammenhørende dataserier for regn og flow i afløbssystemet benyttes derefter til kalibrering og evaluering af modellen. Ved evalueringen vurderes om det om modellen beskriver afstrømningsprocessen tilstrækkeligt og såfremt der fortsat er systematiske

afvigelser udvides eller ændres modelstrukturen så den bedre beskriver disse variationer. Formålet med denne iterative databaserede fremgangsmåde er at få en model der giver en god beskrivelse af sammenhængen mellem nedbør og afstrømning med få tilstandsvariable og få parametre. Dette muliggør på sigt en etablering af en løbende opdatering i forhold til måleværdier, en løbende kalibrering og gennemregning af et stort antal kørsler i forbindelse med usikkerheds estimering og optimeret styring.



Figur 5.3.b
Illustration af den databaserede fremgangsmåde ved opbygning af modellen.

Til kalibrering af afstrømningsmodellen er brugt data fra en nærliggende regnmåler. Kalibreringen bør gentages med radar data på et senere tidspunkt når systemet har været i drift i en længere periode og der foreligger flere hændelser med vel justeret/kalibreret radar data.

Modellerne i dette projekt er opbygget af WaterAspects[®] komponenter til beskrivelse af hhv. et oplandareal, lineare reservoirer og bassiner. WaterAspects[®]s fleksible funktionsbaseret variable definition er benyttet til beskrivelse af styringer, stuvninger og niveau-volumen forhold i afløbssystemerne.

Flere oplysninger om modelleringsværktøjet WaterAspects[®] henvises til hjemmesiden www.WaterAspects.org samt til artiklen Grum et al. (2006). De generelle principper for model opbygning minder i store træk om den metode der er beskrevet i artiklen Grum et al. (2005).

5.4

Brugergrenseflade - vejrradarprognose

Vejrradardata sendes både direkte til Krüger for anvendelse i WaterAspects og til en præsentationshjemmeside (vejrradar.dk). Siden er indrettet på den måde at man altid kan vælge og se data på et udvalgt opland, figur 5.4.a. Formålet med hjemmesiden er at præsentere resultaterne fra alle vejrradarprognoserne ét sted. Kortene er implementeret i Google Maps for at have online opdatering af kort eller luftfoto. Betingelsen for at anvende

Google Maps er at det ikke er kommercielt og at siderne er offentlig tilgængelige.

www.vejrradar.dk • 2008

Vejrradarbaseret styring af spildevandssystemer

Valg af by

Link til relevante hjemmesider

Home
Aalborg
Holstebro
Hvidovre
Odense
Århus
Krøger
AAU
Projektet



Placering af radar

NYHEDER

- **Headlines »**
Hjemmeside for Vejrradar baseret styring af spildevandssystemer er startet
- se: www.regnradar.dk
- **Headlines »**
Online afstrømningsmodel
- se: www.star2.dk:24001

Vejrradar

Aalborg vejrradar: online

Holstebro vejrradar: offline

Hvidovre vejrradar: online

Odense vejrradar: online

Århus vejrradar: online

Prognose

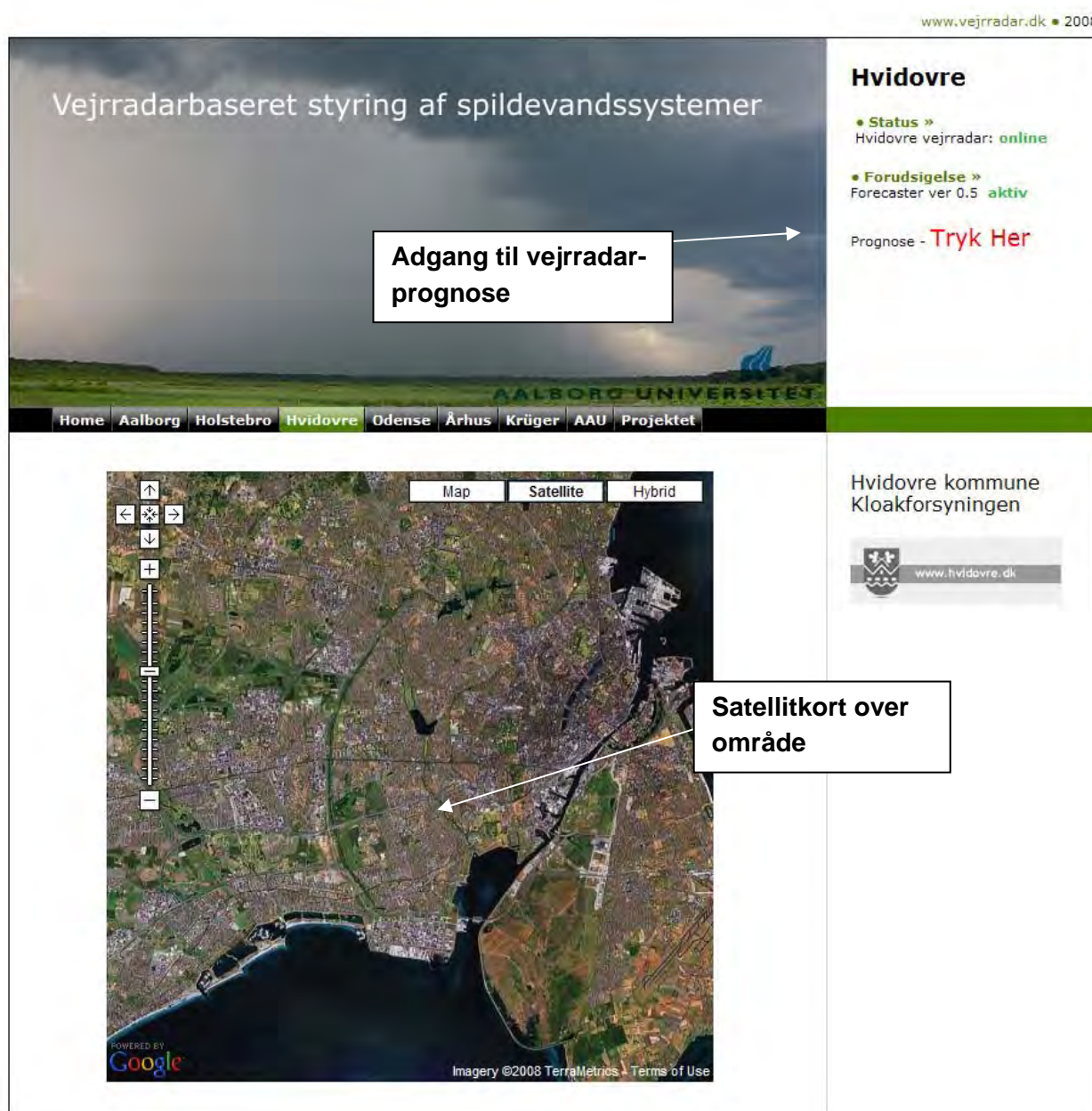
Prognose aktiv

Dataoverførsel

AAU-Krøger: OK

Figur 5.4.a
Hovedside for vejrradarprognose – www.vejrradar.dk

Når man vælger en case at se nærmere på (f.eks. Hvidovre) bliver man dirigeret over på en ny side, figur 5.4.b. På denne hjemmeside er der et oversigtbillede af kommunen samt link direkte til forsyningsvirksomhedens prognoseside. Ved at trykke på linket, bliver man automatisk ledt videre til Hvidovres prognoseside, figur 5.4.c.

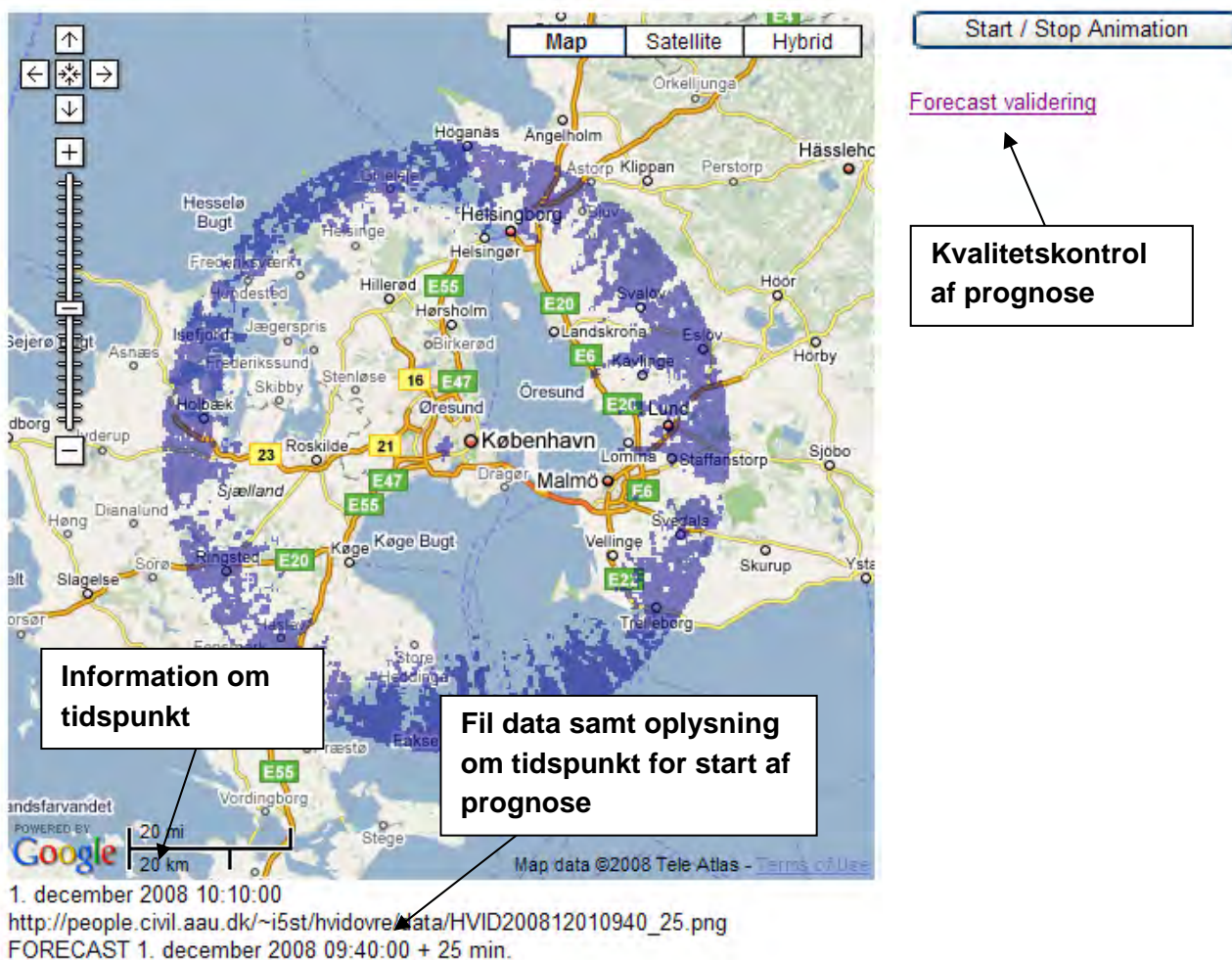


Figur 5.4.b
Side for Hvidovre kloakforsyning

Det er muligt at skifte mellem satellitkort, alm. kort og hybridkort. Der kan med slideren i siden af billedet zoomes ind og ud. Man kan også med musen bevæge billedet rundt.

Det er muligt at se en animation af den sidste times nedbørsmåling efterfulgt af én times prognose af nedbøren for de lokale radarer og to timer for DMI radaren.

Hvidovre Vejrradar Nowcast

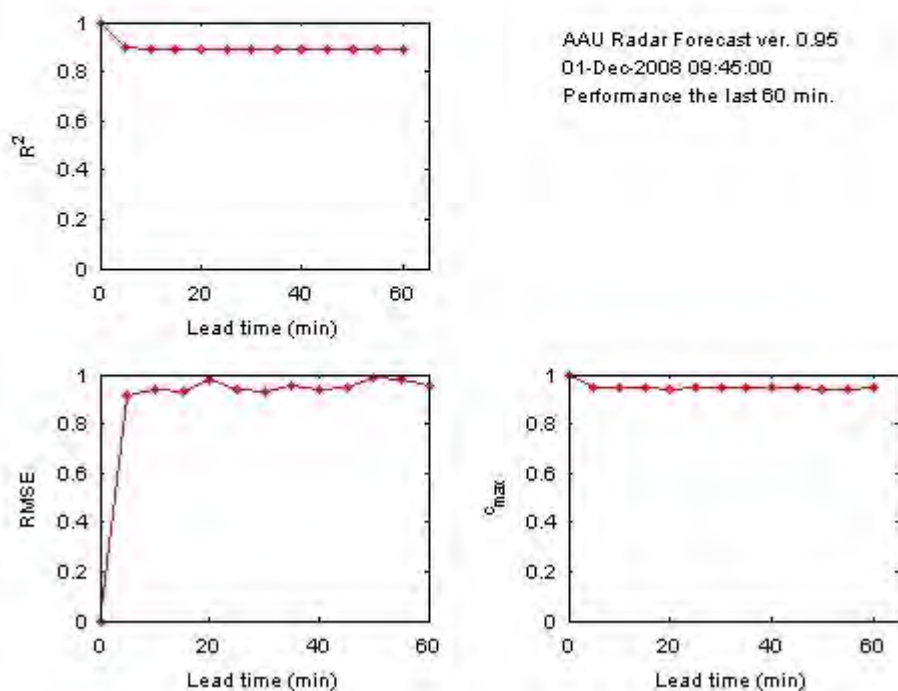


Figur 5.4.c
 Side for prognose baseret på Hvidovre vejrradar.

Som det kan ses af figur 5.4.d opgøres radarens prognosekvalitet på baggrund af, hvor god radar har været gennem den sidste til at forudse regnens udvikling. Pga. støj på Hvidovre radaren fremstår dette kvalitetsmål i de konkrete tilfælde til at være meget positiv. Det skyldes dog at systemet på nuværende tidspunkt ikke skelner mellem regnvejr og tørvejr. For systemet opfattes støjen som regn.

AAU RADAR Nowcast Ver. 0.95 (sep 10, 2008) HVIDOVRE

Validation of the nowcast

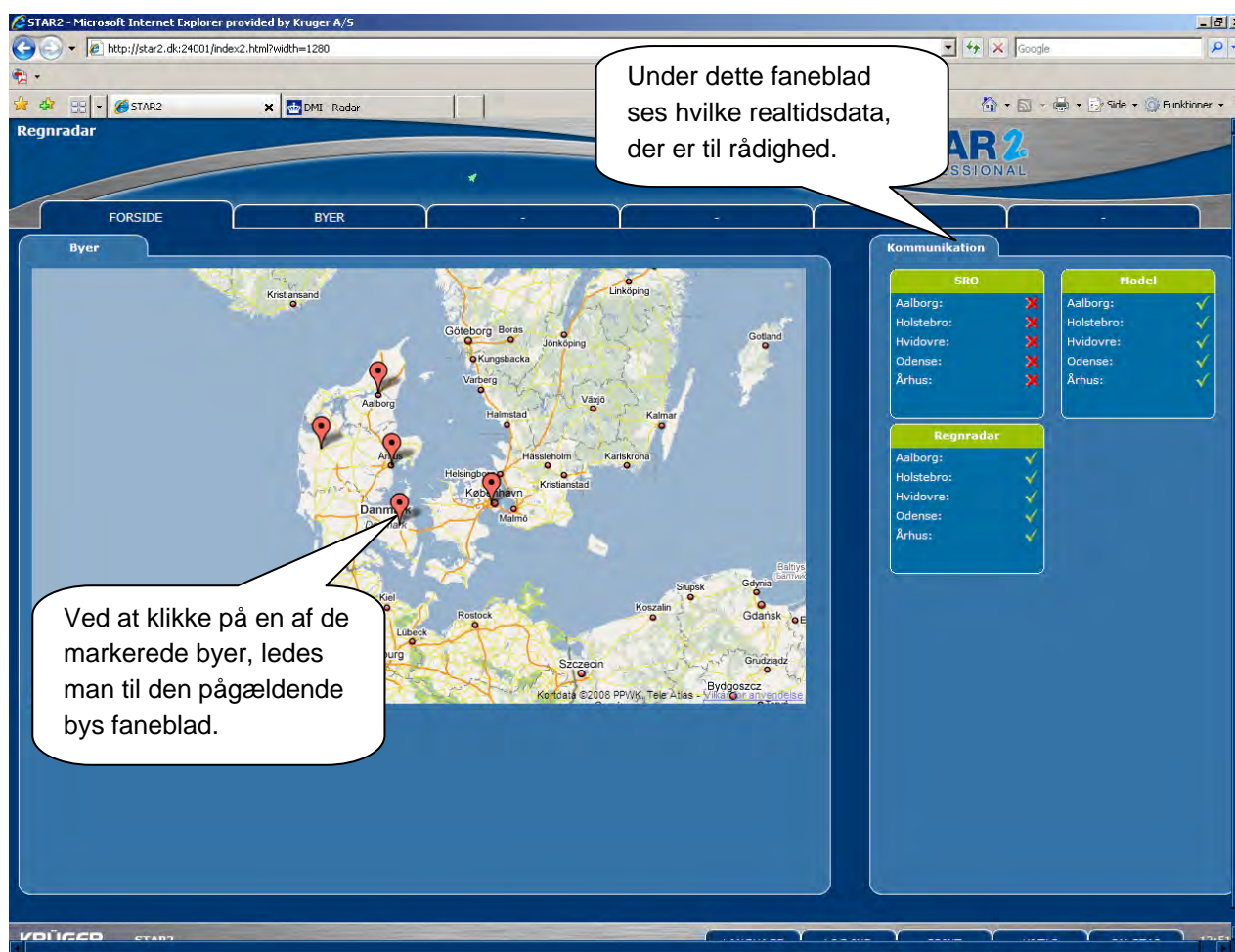


Figur 5.4.d
Side for prognose kvalitet baseret på Hvidovre vejrradar.

5.5

Brugergænseflade - afstrømningsprognose

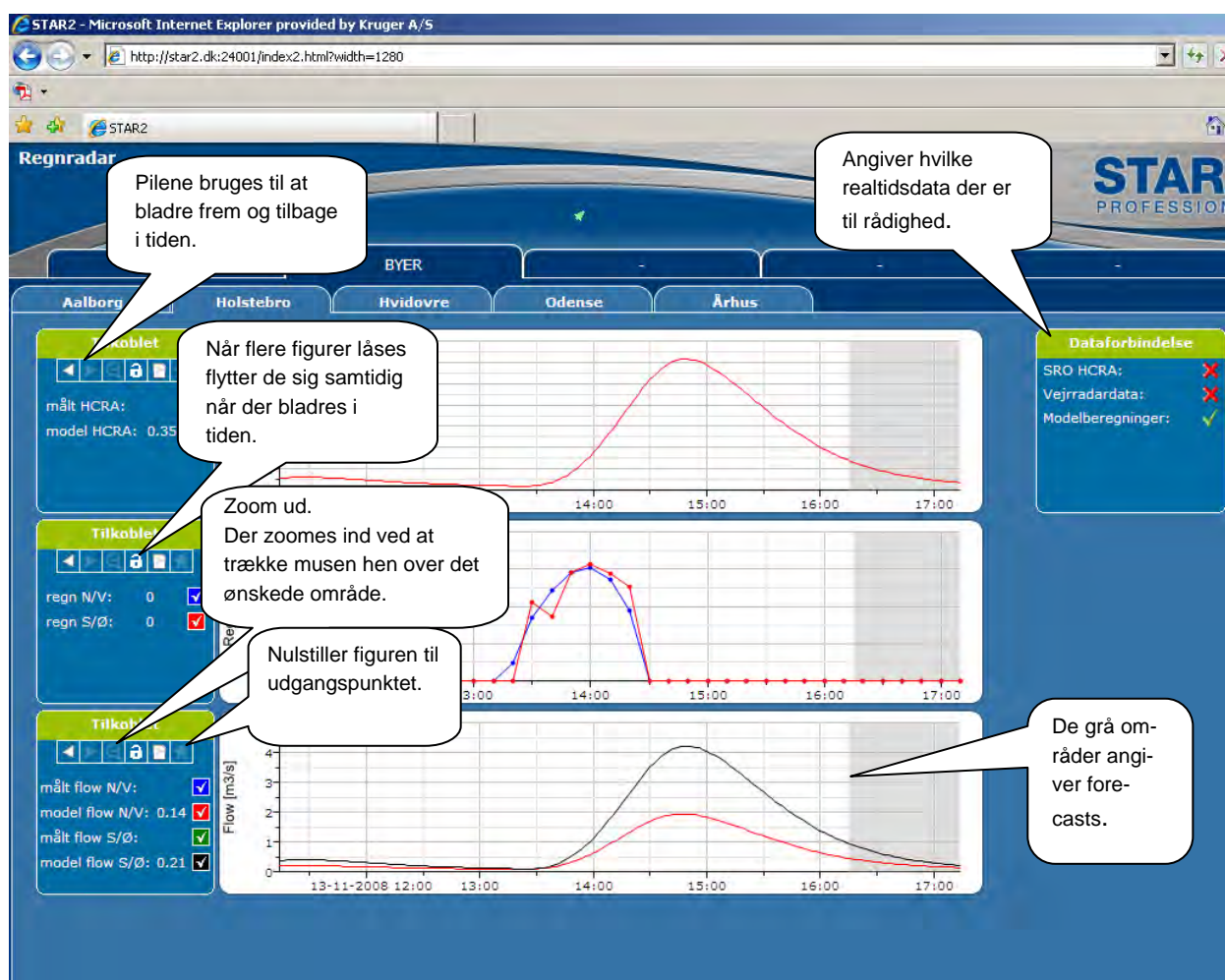
Den webbaserede brugergænseflade, der viser de estimerede radarintensiteter over oplandene, samt de udvalgte målte og modellerede parametre i de respektive afløbssystemer, ses på <http://star2.dk:24001>. Nedenstående figur viser velkomstsiden, der viser et kort med en markør for hvert af de involverede forsyningsselskaber/byer. Ved at klikke på en markør bliver man ført til en side med en oversigt over parametre for den valgte by. Til højre på velkomstsiden ses en oversigt over hvilke realtidsdata der er til rådighed. Røde krydser markerer, at der for det nuværende 2-minutters tidsskridt ikke er opdaterede data. På nedenstående figur ses således at ingen af byernes SRO systemer er koblet på systemet, men at alle modeller kører, og at der er friske radardata for alle byerne.



Figur 5.4.e
Velkomstsiden til afløbsprognose siden.

Figur 5.4.f viser hvad man ser på siden for en specifik by. Siden viser tre eller flere grafer, der hver især viser parameterværdier fra 4 timer tilbage i tiden, til én til to timer frem i tiden. Den grå skraverede del af hver figur viser prognosticerede værdier.

Den øverste graf på siden for en by, viser altid den parameter der er hovedfokus for modellen. Når SRO data er til rådighed bliver de plottet i samme figur som de tilsvarende modellerede parametre. Den eller de efterfølgende grafer viser radardataene, mens eventuelle sekundære parametre fra modellen afbildes på de sidste grafer.



Figur 5.4.f
Siden for en specifik by.

6. Fem cases

I følgende afsnit præsenteres prognoser, kalibreringen, resultater, vurderinger mv. for hver af de fem anvendte cases, hhv. Aalborg, Århus, Holstebro, Hvidovre og Odense

6.1

Aalborg

Renseanlæggets kapacitet under regn har afgørende betydning for hvor ofte og hvor meget urensset spildevand der aflastes under regn. Renseanlægget Aalborg Vest (RAV) har derfor implementeret ATS regnstyring der søger at maksimere den hydrauliske kapacitet af den biologiske rensning. Der kræves en 1 til 2 timer for fuld omstilling fra tørvejrdrift til ATS regnvejrdrift med maksimal kapacitet. Renseanlægget når derfor ikke altid at slå over i regndrift inden de store afstrømningsmængder når ned til anlægget. På denne måde vil den radarbaserede varsling kunne muliggøre et tidligere omslag til regndrift og derved minimere aflastning af urensset spildevand.

Som en naturlig følge af ovenstående har Aalborg Kommune Kloakforsyningen i dette projekt valgt at få opstillet prognosesystemet for tilløbet til RAV, som er angivet på figur 6.1.a.



Figur 6.1.a Den røde nål angiver Aalborg Renseanlæg Vest.

6.1.1

Radaropsætning og resultater

Aalborg-radaren er placeret i St. Restrup ca. 10 km vest for Aalborg C, hvilket er en perfekt placering i forhold til at måle nedbør kvantitativt i det meste af Aalborg Kommune og især Aalborg C.

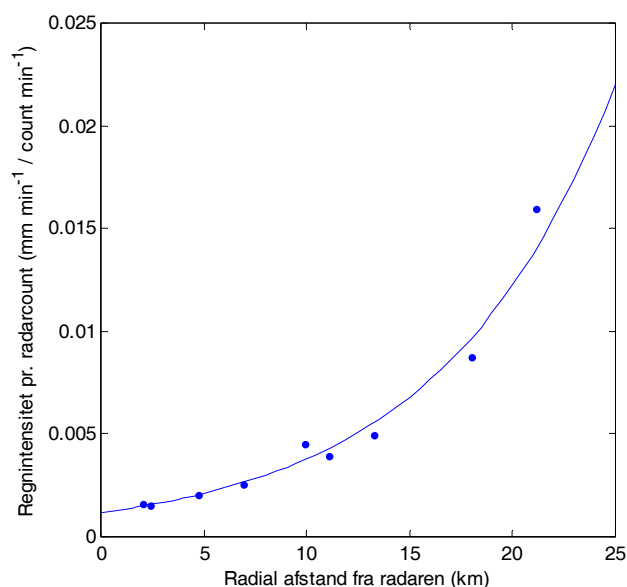


Figur 6.1.1.a
Aalborg-radaren

Tabel 1 Specifikationer for Aalborg-radaren

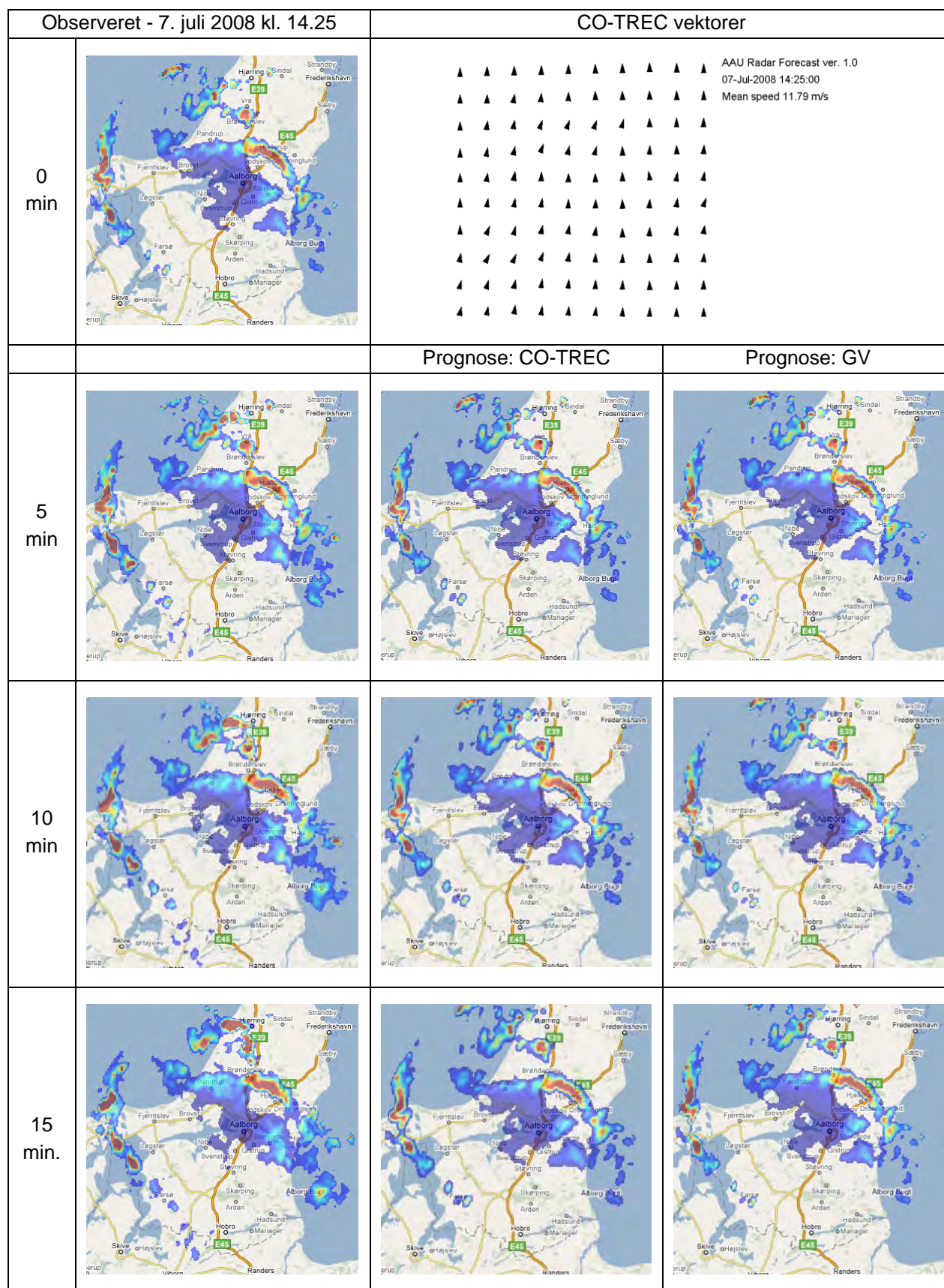
| | |
|-------------------------|--|
| Frekvens | 9,4 GHz |
| Bølgelængde | 3,2 cm |
| Udgangseffekt | 25 kW |
| Rækkevidde | 60 km |
| Stedsopløsning | 500 x 500 m |
| Tidsopløsning | 5 min (midlet) |
| Horisontal strålebredde | 0,95° |
| Vertikal strålebredde | ±10° |
| Ejer | Aalborg Kommune og Aalborg Universitet |
| Driftsansvarlig | Aalborg Universitet |
| Producent | DHI |
| Fabrikat | Furono 1525 mrk 3 |
| Placering | St. Restrup (Aalborg) |
| Koordinat | UTM Zone 32 (E 547546, N 6318589) |
| Igangsæt i projektet | 1. jan 2008 |
| Datastatus | Kalibreret efter nedbørsmålere |

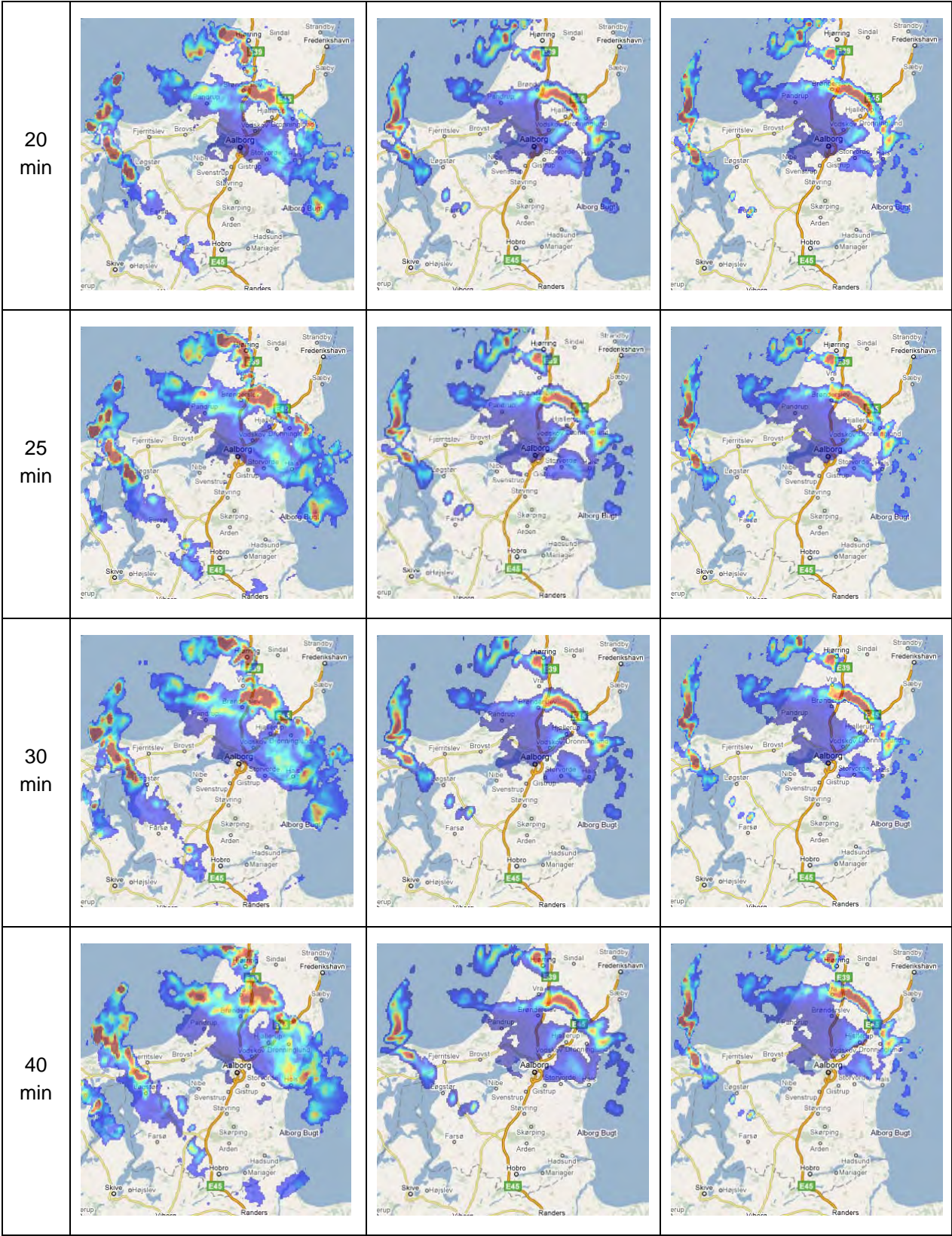
Kalibreringen af Aalborg-radaren er foretaget af Aalborg Universitet ved hjælp af ni af spildevandskomiteens regnmålere i Aalborg Kommune. Disse er alle placeret inden for en radius af ca. 20 km fra radaren. Der er været anvendt data fra juli til og med september 2008 i alt 160 mm regn (gennemsnit af de ni regnmålere). På figur 6.1.1.b ses resultatet af radarkalibreringen med tilhørende afstandskorrektion. For at undgå meget høje og urealistiske regnintensiteter er der indført et afskæringsniveau ved 20 km, således at transformationen fra radarværdier (counts) til regnintensiteter for afstande fra radaren på under 20 km følger den eksponentielle afstandskorrektion og ved afstande større end 20 km anvendes en konstant transformation.

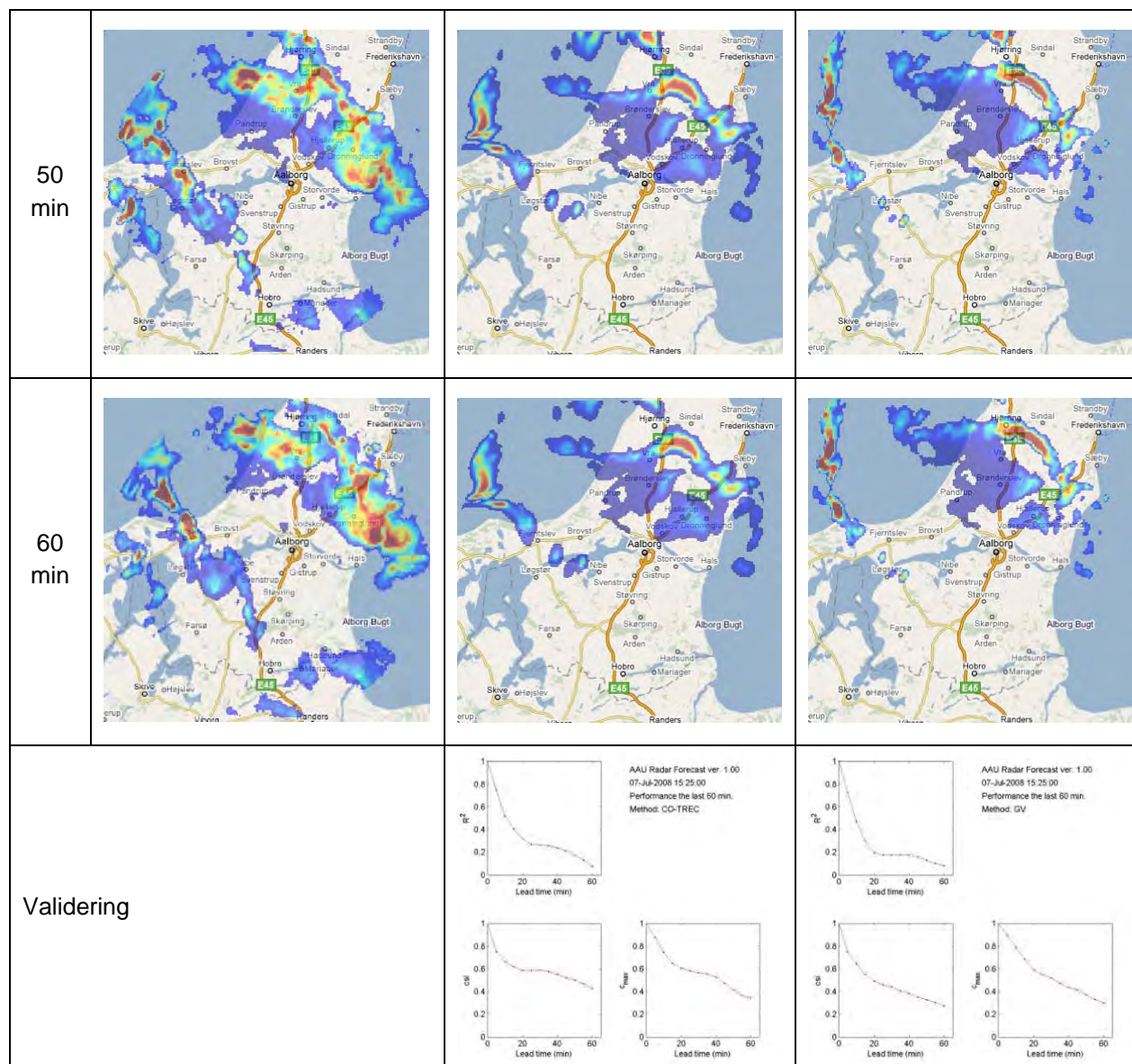


Figur 6.1.1.b
Afstandskorrektion og transformation fra radarværdier til regnintensiteter for Aalborg-radaren

Der er for Aalborg-radaren valgt at vise to eksempler, da radaren har fungeret i hele projektperioden og derfor har et væsentligt større datagrundlag end for de andre radarer. For eksempel er der målt mange kraftige regnhændelser i august og september 2008. Det første eksempel der vises er udvidet i forhold til de andre viste resultateksempler idet alle 5 minutters tidsskridt indtil 30 min er vist og mellem 30 og 60 min. er observationer og prognoser vist med 10 min. Intervaller.

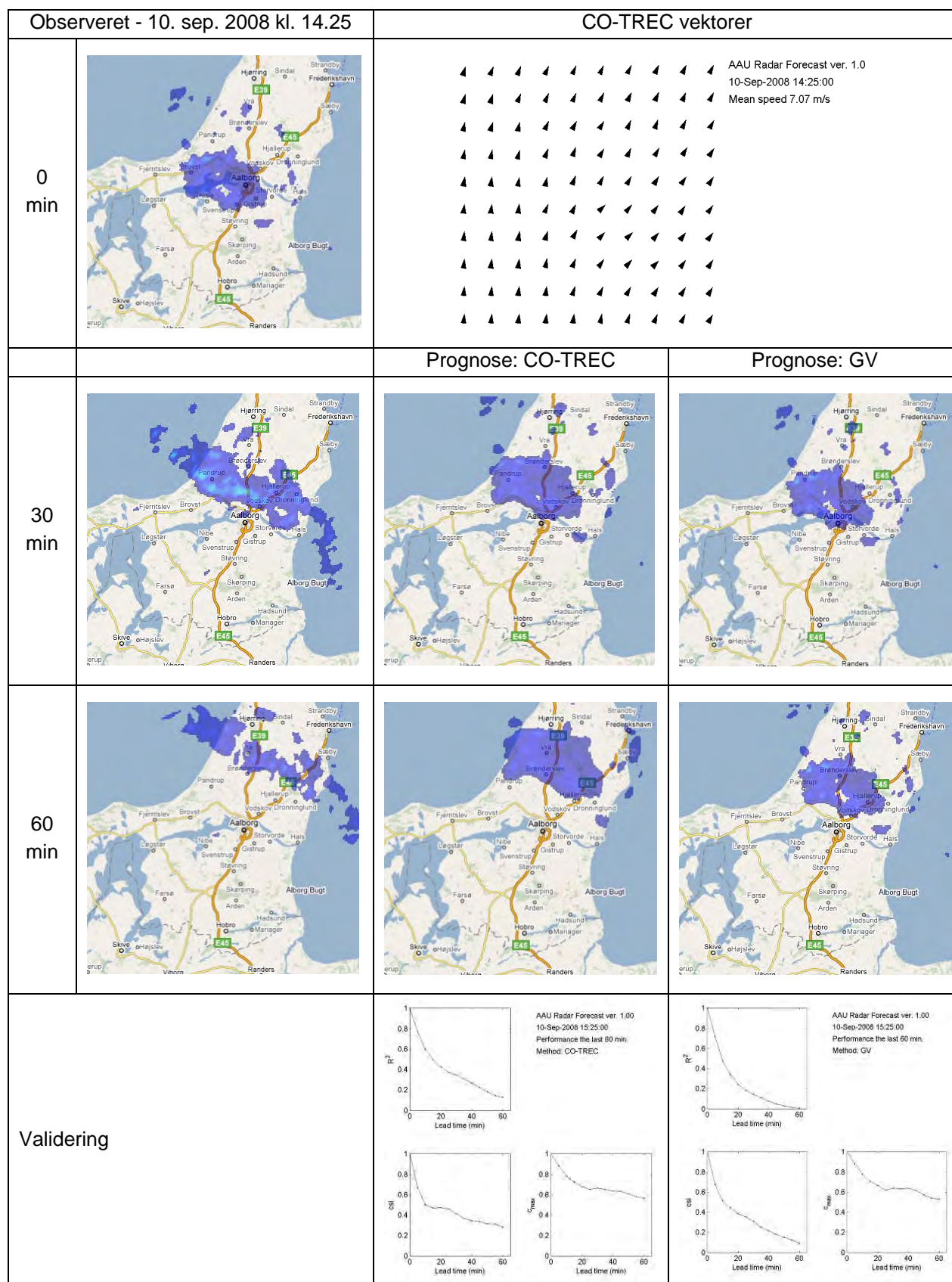






Figur 6.1.1.c
Aalborg - 7. juli 2008 kl. 14.25 (Kort er fra Google Maps)

I det udvidede eksempel fra den 7. juli 2008 er der en meget god korrelation mellem observationer og prognose – især viser CO-TREC-modellen meget gode resultater også udover de 30 minutter, hvor det normalt er vanskeligt at lave en god prognose med X-bånds-data. Det er selvfølgelig tydeligt, at det ikke er muligt at prognosticere den nedbør, der på 0 min. - billedet ligger uden for radarens rækkevidde, men det nedbør der kommer ind i radarbilledet fra syd i de senere tidsskridt medtages følgelig ikke i evalueringen af prognosen på grund af den maske der er indført på dataene.



Figur 6.1.1.d
Aalborg - 10. september 2008 kl. 14.25 (Kort er fra Google Maps)

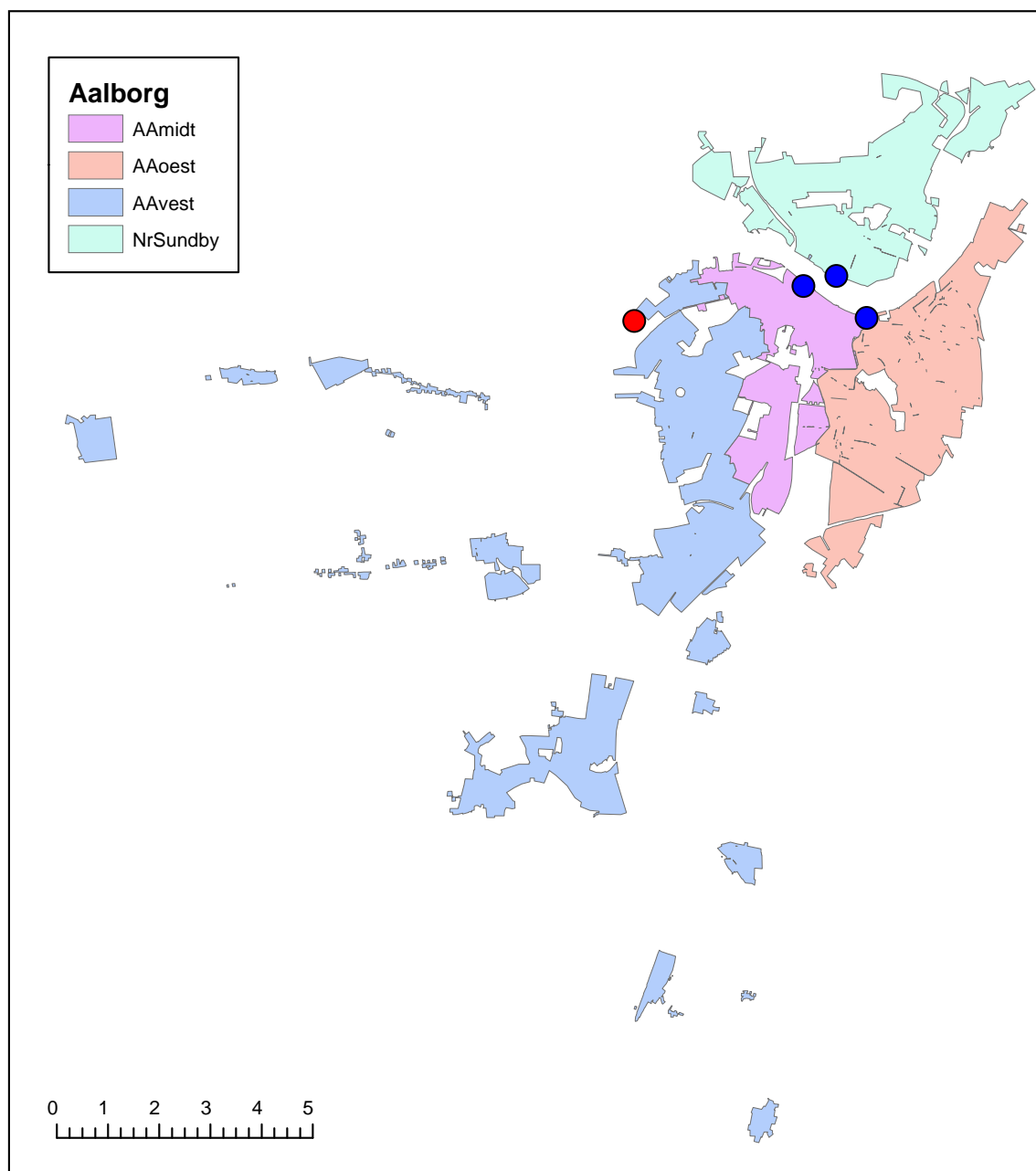
Som det ses af eksemplet fra den 10. september er hændelsen under udvikling, dvs. at den vokser kraftigt i omfang fra det første billede til 30 min senere. I og med at udvikling/henfald ikke er implementeret i prognosemodellerne er det selvfølgelig umuligt af kunne forudsige dette. På trods af dette er det lykkedes fint at prognosticere nedbøren over Aalborg by.

6.1.2

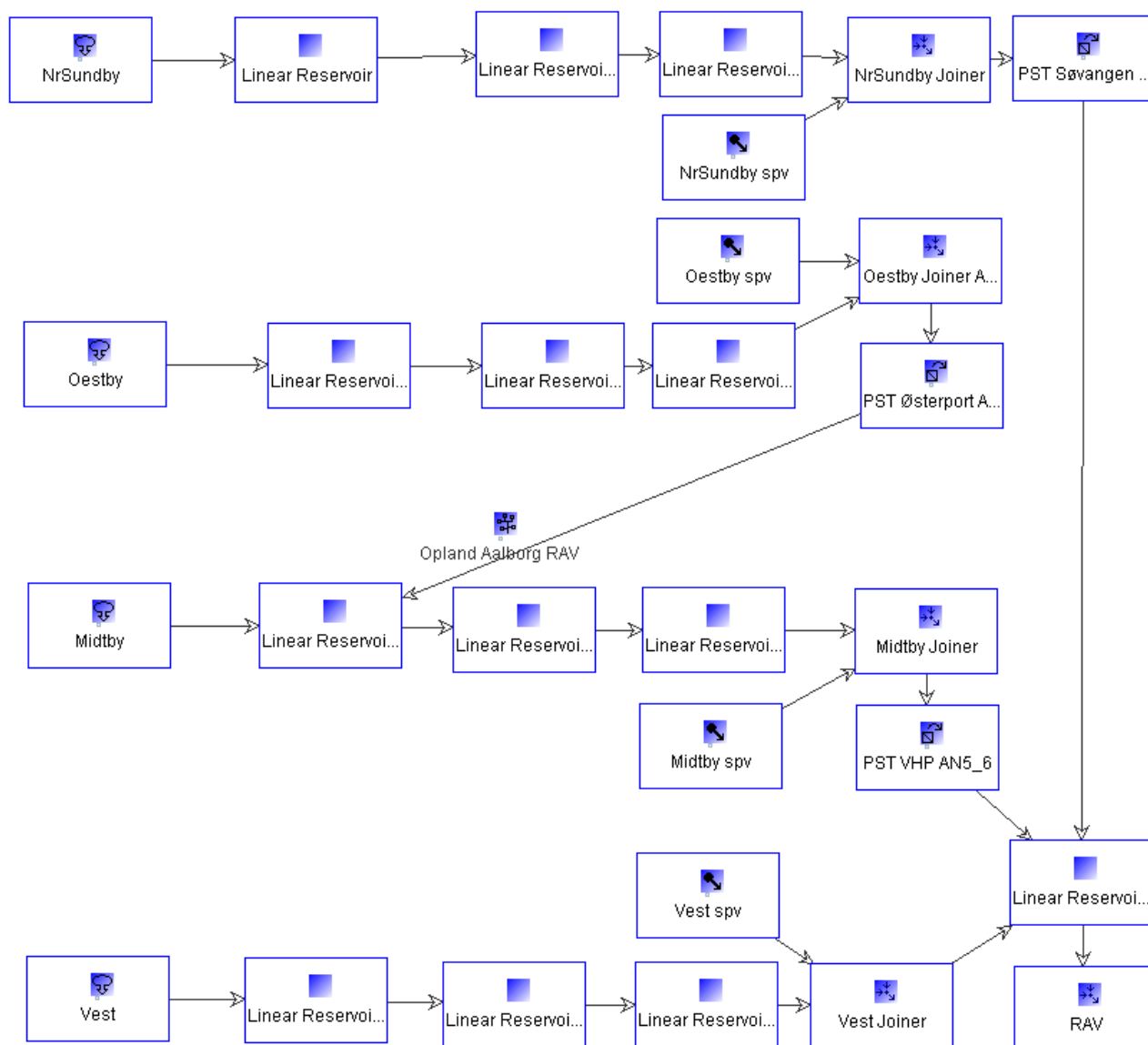
Opbygning af afstrømningsmodel og resultater

For Aalborg er opbygget en model for tilstrømningen til Aalborg Renseanlæg Vest (RAV). Oplandet er delt op i fire dele, hvoraf de tre er velafgrænsede kompakte områder med bymæssig bebyggelse, mens det fjerde opland, Aalborg Vest, inkluderer små spredte byområder i en afstand af op til 10 km fra den indre by, se figur 6.1.2.a. Reelt sker der også afstrømning til oplandet Aalborg Vest fra en del af den syd for beliggende Rebild Kommune, men dette er udeladt i projektet.

En oversigt over WaterAspects modellen kan ses i figur 6.1.2.b.



Figur 6.2.1.a
De fire oplande i Aalborg modellen med angivelse af prognosepunkt (rød) og øvrige kalibreringspunkter (blå).

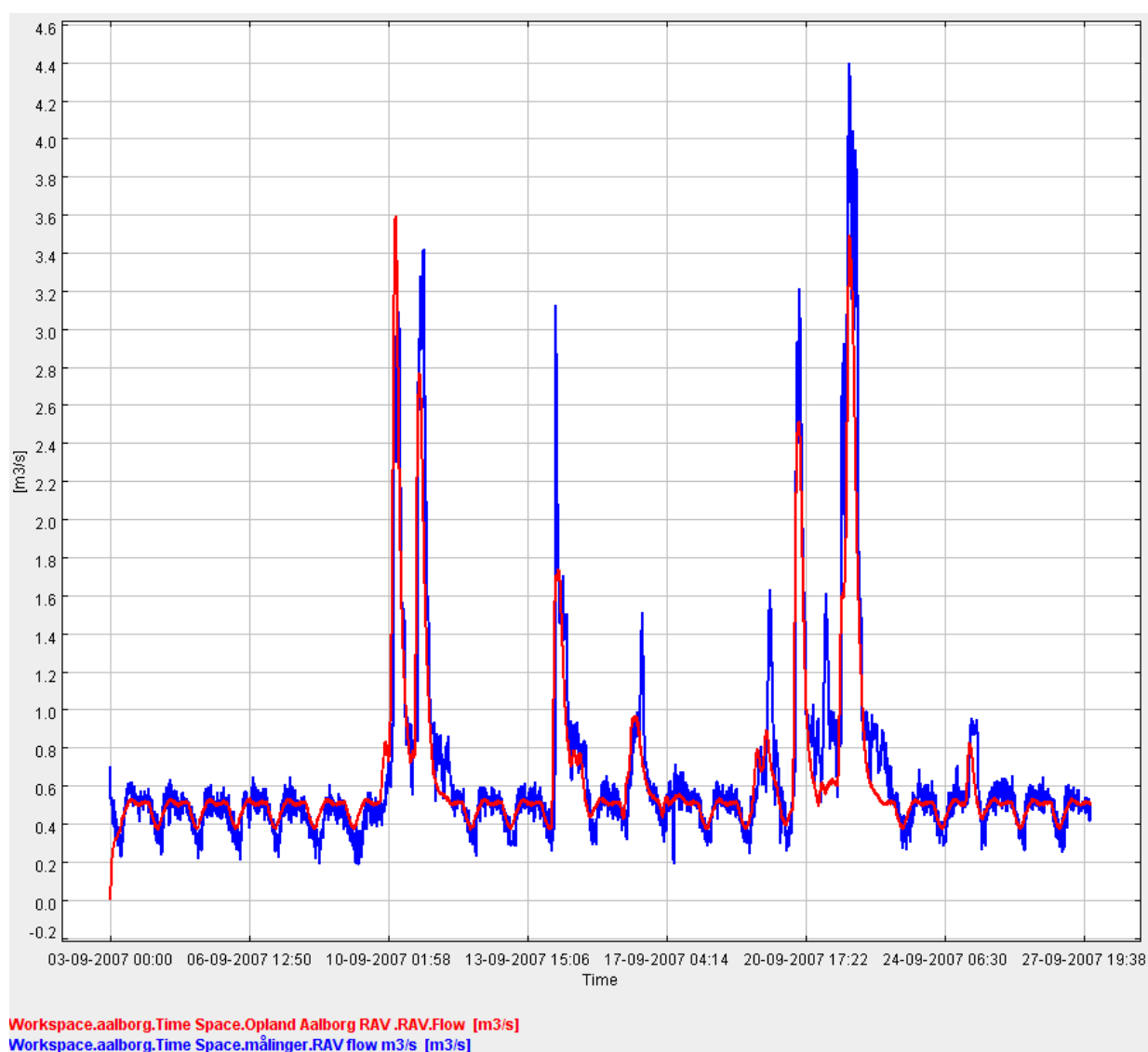


Figur 6.1.2.b:
Oversigt over WaterAspects modellen for Aalborg.

Kalibrering

Kalibreringen af modellen er udført ud fra historiske flowmålinger fra indløbet til Aalborg Renseanlæg Vest (RAV) samt ud fra pumpedata for de tre pumpestationer *PST Søvangen* i Nørre Sundby, *PST Østerport* i Aalborg Østby og *PST Vestre Havnepromenade (VHP)* i Aalborg midtby.

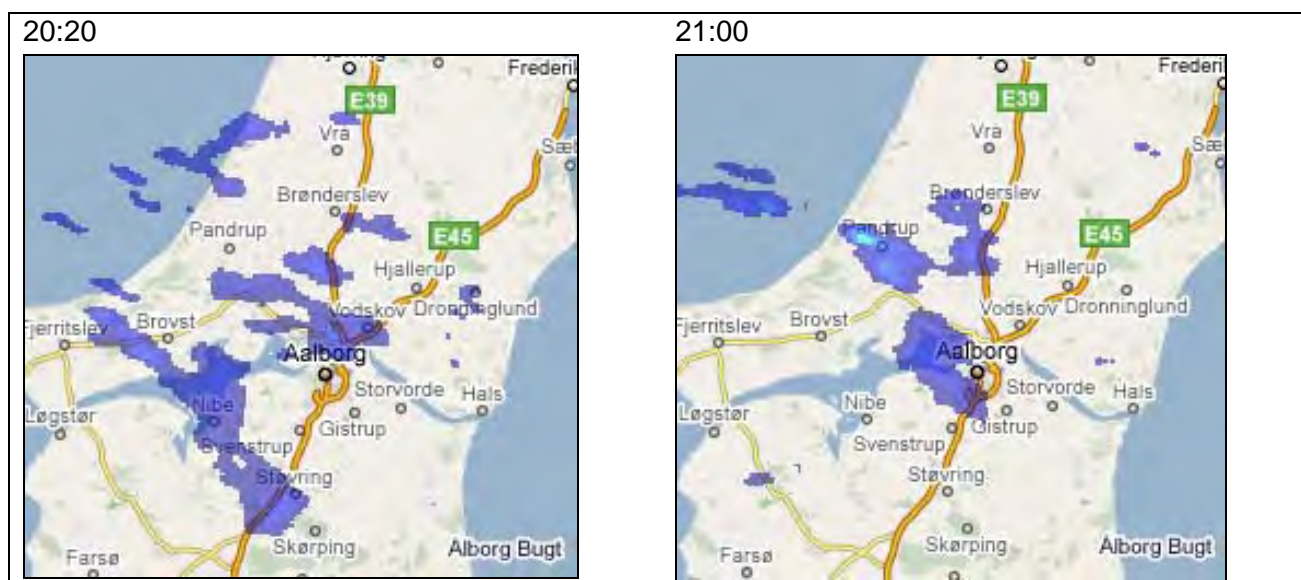
Kalibreringen er udført ud fra data for september måned 2007. Resultatet heraf for indløbet til Renseanlæg Vest ses i figur 6.1.2.c.

**Figur 6.1.2.c**

Målt og modelleret indløb til Aalborg Renseanlæg Vest. Den blå linje er de målte data.

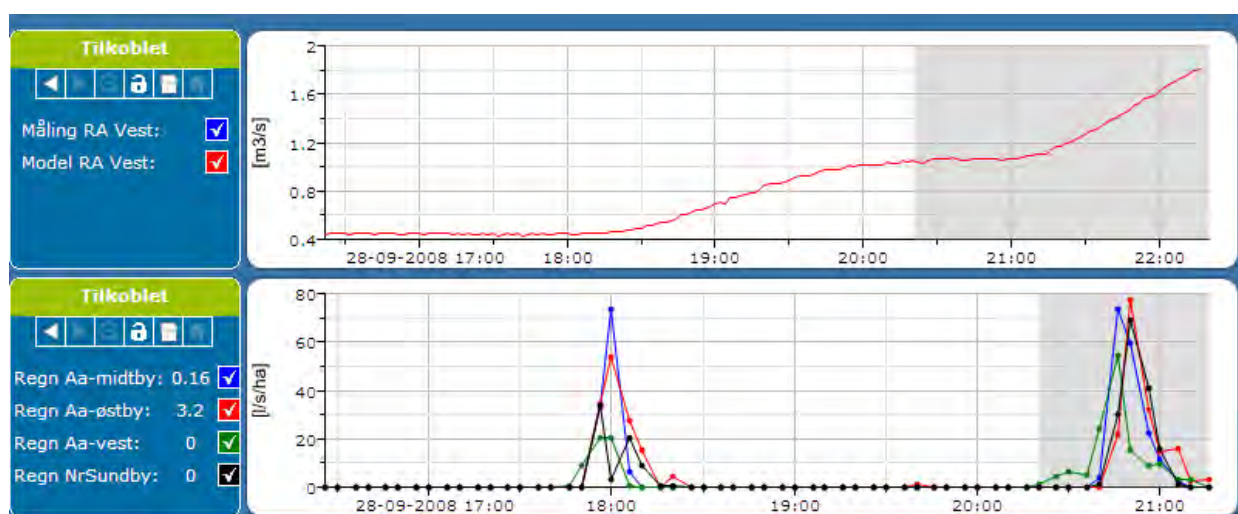
Systemet i brug

I nedenstående figur ses en samling *screen dumps* der illustrerer systemet i drift. Billederne er fra Ålborg d. 28. september, hvor der kom byger ind fra vest. Klokken 20:25 estimerer radaren at byen bliver ramt af et kraftigt regnvejr af ca. en halv times varighed, inden for den næste time, og at dette vil resultere i at indløbet til renseanlægget stiger op mod $2 \text{ m}^3/\text{s}$ efter klokken 22. Af billederne fra klokken 21:00 ses det at den prognosticerede nedbør i høj grad har svaret til det målte, og at prognosen for indløbet til renseanlægget derfor ligeledes er relativt uændret. Prognosen for indløbet til renseanlægget lavet klokken 21:00 er imidlertid behæftet med en lavere usikkerhed end prognosen fra klokken 20:25, da den nyeste indløbsprognose er domineret af målt nedbør og at usikkerheder der stammer fra radarens prognose derfor får begrænset indflydelse.



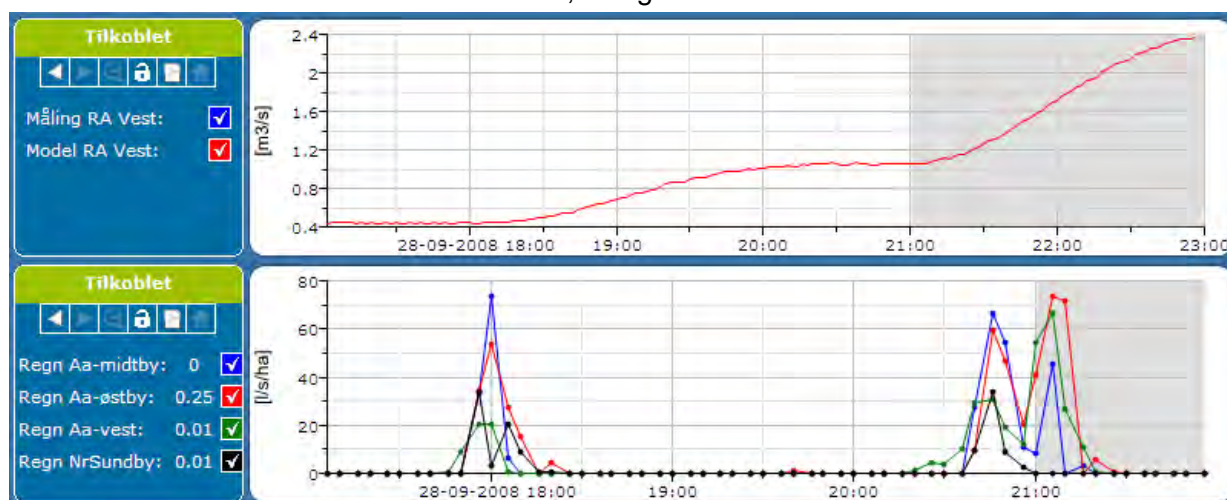
Figur 6.1.2.d
To radarbilleder fra Ålborg radaren med 40 minutter imellem.

20:20 – Radaren estimerer at der begynder at regne inden for den næste halve time, og at dette vil medføre en af tilstrømning til RA Vest på $1.6 \text{ m}^3/\text{s}$ klokken 22, se figur 6.1.2.e.



Figur 6.1.2.e
STAR brugerfladen fra klokken 20:20.

21:00 – Starttidspunkt og intensitet af hændelsen var rigtigt estimeret, men hændelsen viste sig at være længerevarende end radaren først estimerede. Tilstrømningen kl. 22 bliver stadig estimeret til $1.6 m^3/s$, men stigende ind til klokken 23, se figur 6.1.2.f.



Figur 6.1.2.f
STAR brugerfladen fra klokken 21:00.

6.1.3

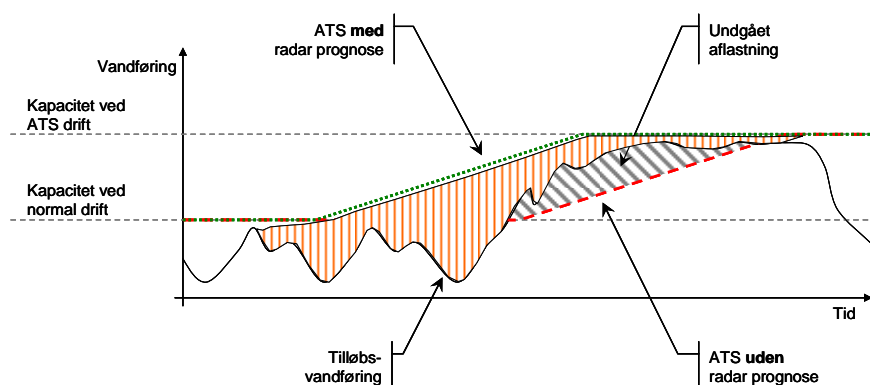
Vurdering og perspektiver

Da Aalborg-radaren har fungeret i hele projektperioden har der været et meget godt datagrundlag for at undersøge forskellige aspekter af nedbørsprognoserne. Især var der i august og september 2008 mange både konvektive og stratiforme hændelser med høje regnintensiteter. Generelt vurderes det at prognosemodellerne har givet rigtigt gode resultater op til 30 minutters fremskrivning. Mellem 30 og 60 minutter har resultaterne været mere usikre.

I dag opstartes regnstyring ud fra signalet fra en enkelt nedbørsmåler på anlægget, men da denne måling selvsagt ikke er repræsentativ for nedbøren over hele oplandet, vil en radar prognose kunne forbedre opstarten af regnstyring.

Dette er illustreret i nedenstående figur hvor den undgåede aflastning er vist som det skråkraveret område.

Der ligger et yderligere potentiale ved en sammenstyring af renseanlæg og afløbssystem så der på baggrund i den radar baserede prognose af den forventede tilstrømning føres mere vand ned til renseanlægget tidligere i hændelsen.



Figur 6.1.3.a

Illustration af hvordan radar prognosen kan bidrage til undgået aflastning tidligt i starten af regnhændelser (skråkraveret) og af det potentiale der yderligere kan opnås ved samtidigt at sammenstyre afløbssystem og renseanlæg. Det lodret - skråkraverede område indikerer ledig kapacitet på renseanlægget og kan anvendes i en samstyringsstrategi.

Aalborg renseanlæg øst er et andet stort renseanlæg i oplandet, hvor der også er installeret ATS regnstyring. Når konceptet med radar prognosen er færdig udviklet, vil det med fordel også kunne implementeres på dette anlæg.

6.2

Århus

Det valgte prognose punkt i Århus afløbssystem er flow i Jægergaardsgade pumpestationen, der modtager al afstrømning fra den nordlige del af oplandet til Marselisborg renseanlæg. En prognose i dette punkt kan bidrage til en optimeret af fyldning og tømning af nogle af de store bassiner i oplandet og give mulighed for en tidligere opstart af regnstyringen på Marselisborg renseanlæg. Begge dele ville reducere antallet og mængden af aflastninger til badevandsområdet ud for Århus.



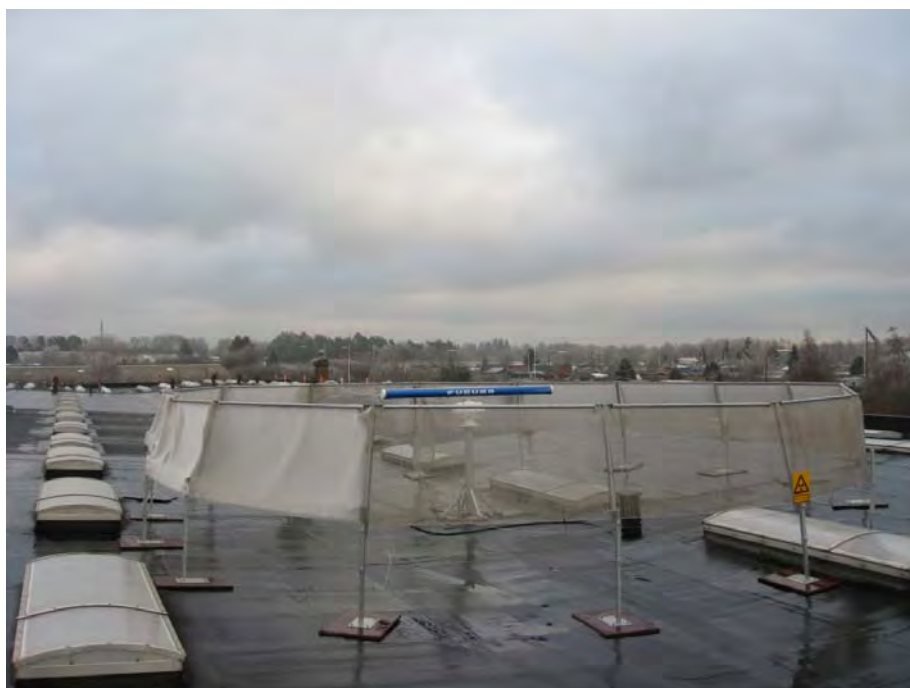
Figur 6.2.a

Den røde nål angiver placeringen af Jægergaardsgades pumpestation.

6.2.1

Radaropsætning og resultater

Århus-radaren er placeret i Århus Vest med en afstand til Århus C på ca. 6 km, hvilket er en god afstand til at kunne måle nedbør kvantitativt over Århus C.



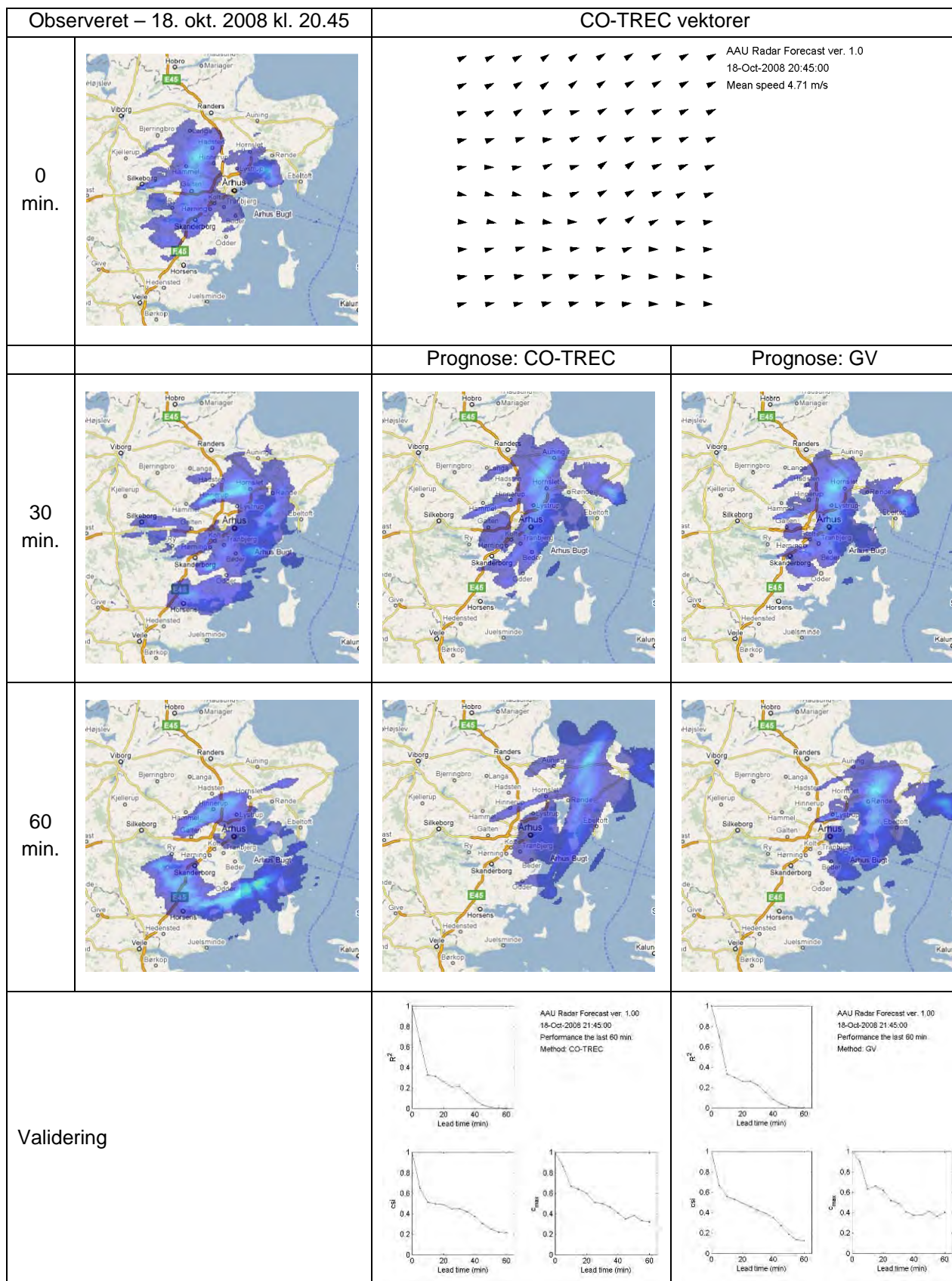
Figur 6.2.1.a
Århus LAWR radar med clutterfence (DHI 2008).

Tabel 2 Specifikationer for Århus-radaren

| | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Frekvens | 9,4 GHz |
| Bølgelængde | 3,2 cm |
| Udgangseffekt | 25 kW |
| Rækkevidde | 60 km |
| Stedsopløsning | 500 x 500 m |
| Tidsopløsning | 5 min (midlet) |
| Horisontal strålebredde | 0,95 ⁰ |
| Vertikal strålebredde | ±10 ⁰ |
| Ejer | Århus Kommune |
| Driftsansvarlig | DHI |
| Producent | DHI |
| Fabrikat | Furono 1525 mrk 3 |
| Placering | Edwin Rahrs Vej, 8220 Brabrand |
| Koordinat | UTM Zone 32 (E 569021, N 6224990) |
| Igangsæt i projektet | 7. okt. 2008 |
| Datastatus | Kalibrering er undervejs |

Århus-radaren er installeret sent i projektperioden, og dermed har det ikke været muligt at måle nogle højintensive og konvektive sommerregnhændelser.

De data der i dette projekt er anvendt fra Århus er ikke kalibreret ind efter regnmålerdata, da dette ligger uden for rammerne af dette projekt at gennemføre kalibreringen. Hermed er der ligeledes ikke foretaget nogen afstandskorrektion på radardataene. De data der anvendes i afstrømningsmodellen er derfor de rå radardata, men da afstrømningsmodellen kalibreres i flere observationspunkter, vurderes dette ikke at have så stor betydning for det endelige modelresultat.



Figur 6.2.1.b
Århus - 18. Oktober 2008 kl. 20.45 (Kort er fra Google Maps)

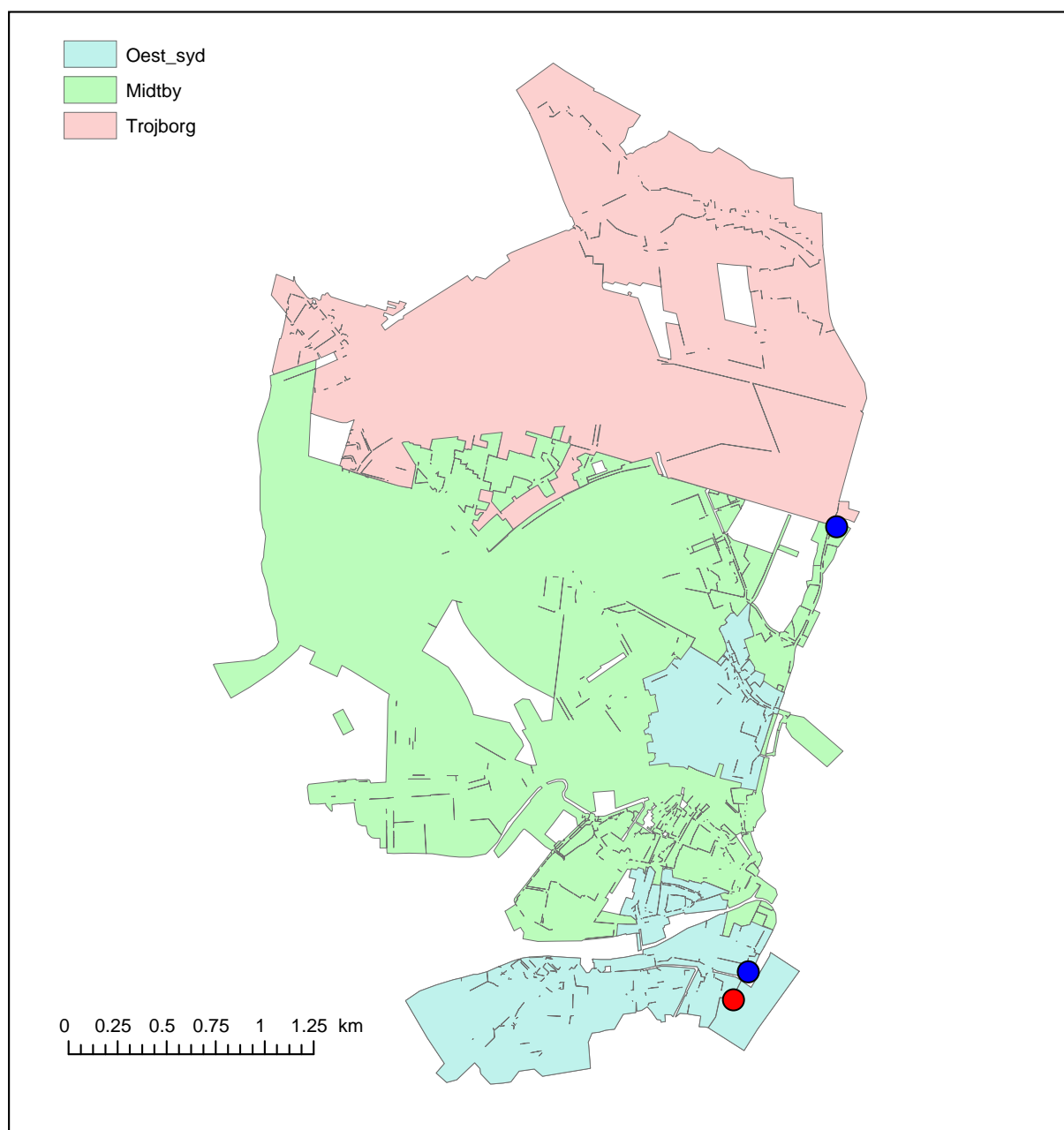
Det ses ud fra eksemplet på figur 6.2.1.b at det har muligt af lave en tilfredsstillende prognose for nedbøren over Århus, dog er der større afvigelser når man sammenligner observationer og prognose (især i 60 min. fremskrivningen) i periferien af radarens rækkevidde. Dette skyldes at regnen henfalder, og at prognosemodellen ikke tager højde for dette fænomen.

Idet valgte eksempel er en minimal forskel på CO-TREC og GV, hvilket skyldes at nedbøren kommer fra vest i en forholdsvis ensrettet bevægelse. De lokale flytningsvektorer afviger følgende ikke fra den globale vektor.

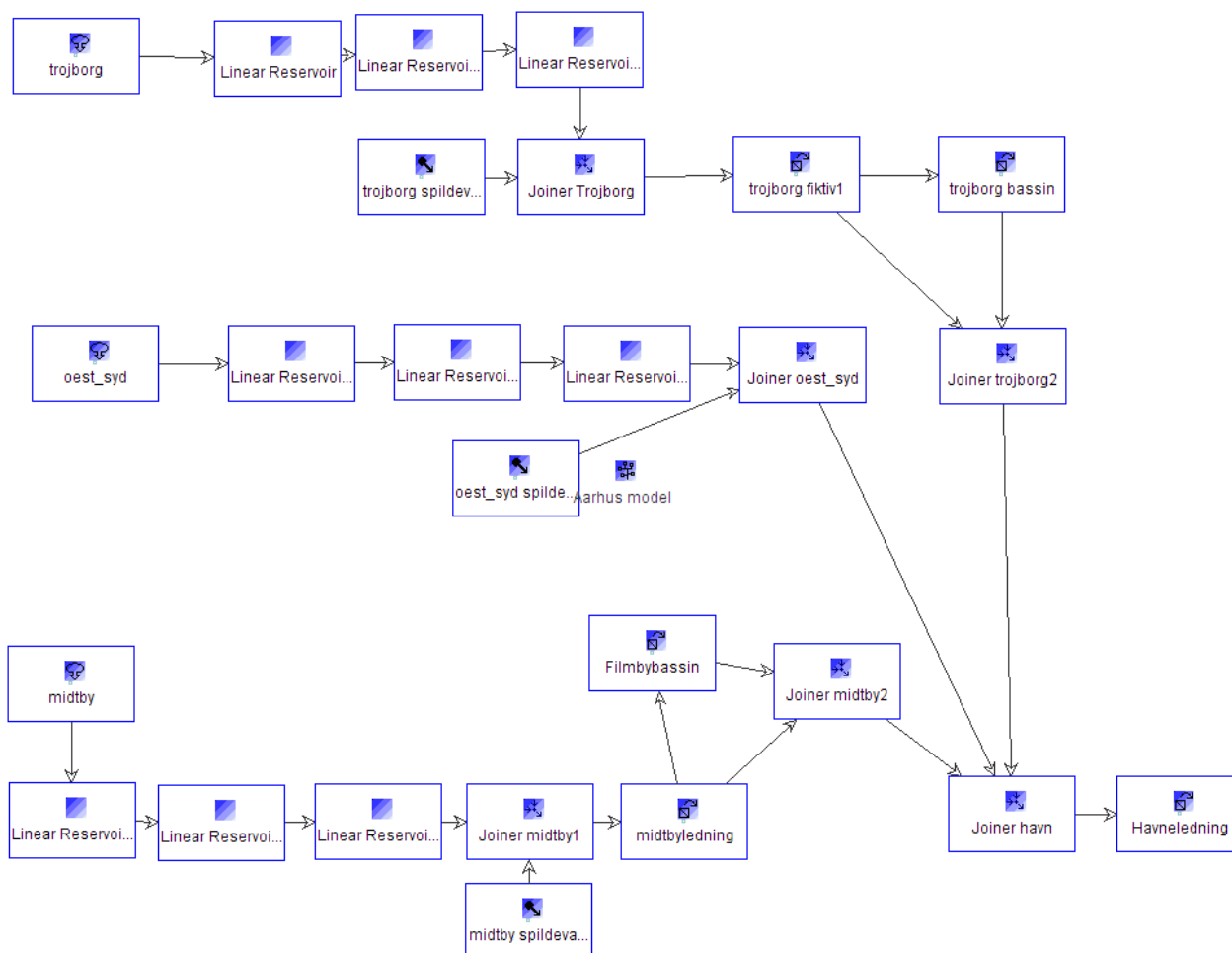
6.3

Opbygning af afstrømningsmodel og resultater

Aarhus modellen er bygget op omkring de tre oplande Midtby, Trøjborg og Øst/Syd, se figur 6.3.a. Afstrømningen fra alle tre oplande samles i bassinledningen *Havneledningen*. Jægergårdsgade Pumpestation (JGP) pumper fra denne ledning, og det er dette flow der er den primære parameter for Aarhus. Derudover er der to sekundære parametre i niveauerne i de to opsamlingsbassiner *Filmbybassinet* og *Trøjborgbassinet*, der ved spjældstyring opsamler afstrømning fra henholdsvis Midtbyen og Trøjborg. En oversigt over WaterAspects modellen kan ses i figur 6.3.b.



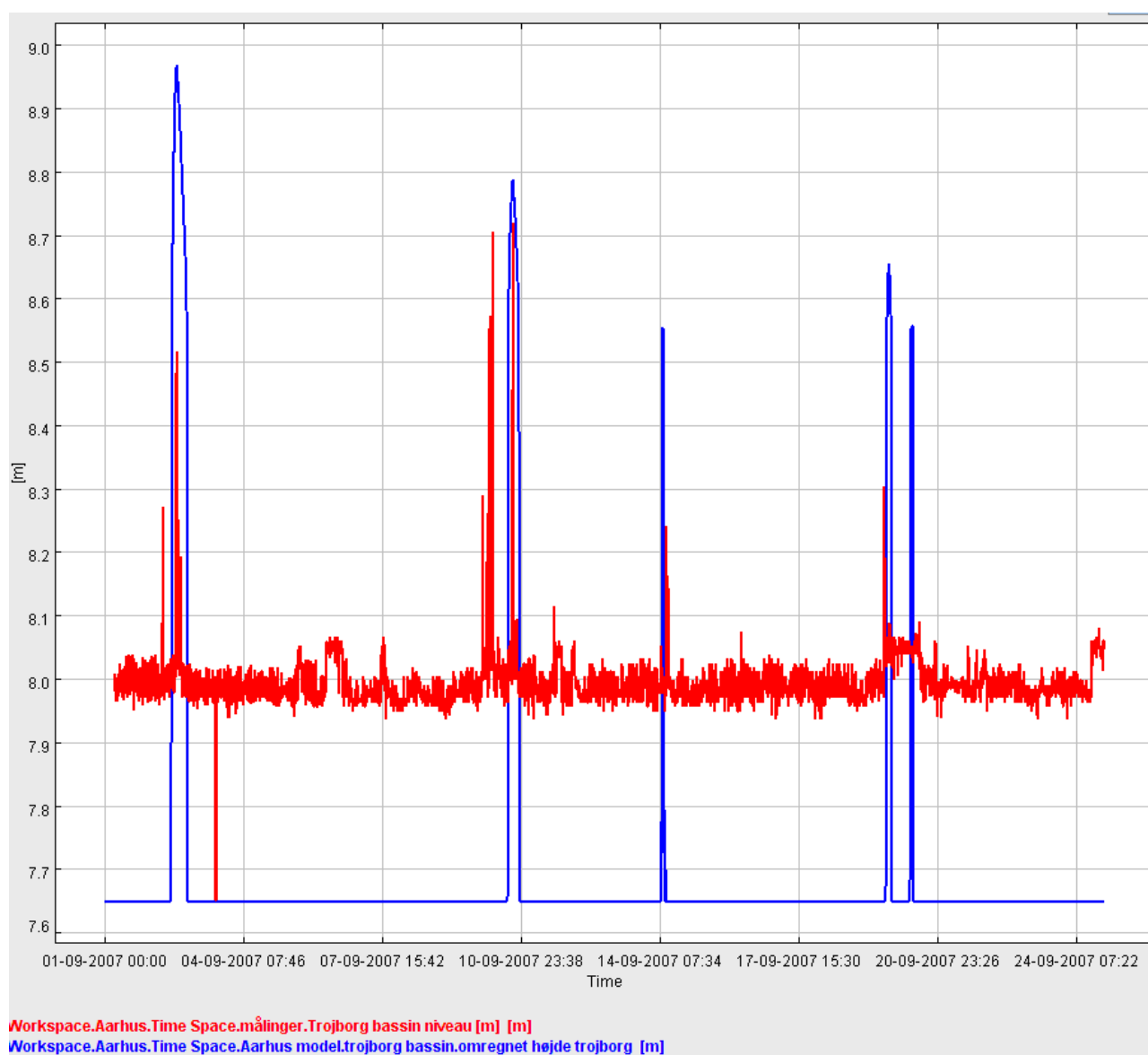
Figur 6.3.a
De tre oplande i Aarhus med angivelse af prognosepunkt (rød) og øvrige kalibreringspunkter (blå).



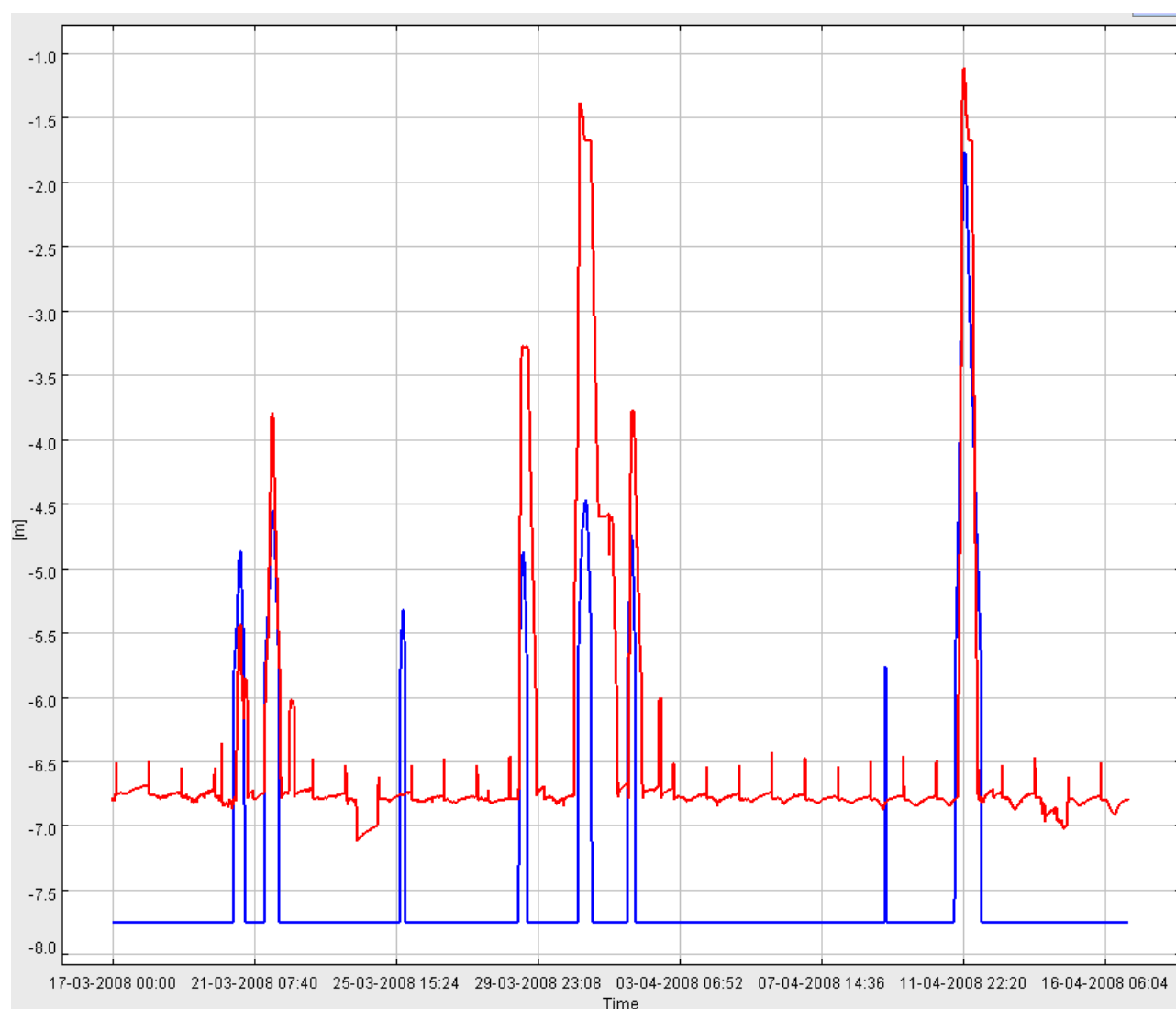
Figur 6.3.b
Oversigt over WaterAspects modellen for Aarhus.

Kalibrering

For alle de vigtigste punkter i systemet har der været historiske måledata til rådighed i form af flowmålinger eller niveaumålinger, eller begge dele. Dette har naturligvis hjulpet i kalibreringen af modellen. Kalibreringen er udført ud fra data for september måned 2007. De to nedenstående figurer viser den kalibrerede model imod de historiske målte data for Filmby og Trøjborg bassinerne. Grunden til, at der er forskel i basisniveauet i bassinerne skyldes, at de to pumpe-sumpe reelt aldrig er helt tørre.

**Figur 6.3.c**

Målt og simuleret niveau i Trøjborg bassinet. Den røde streg er det målte niveau.

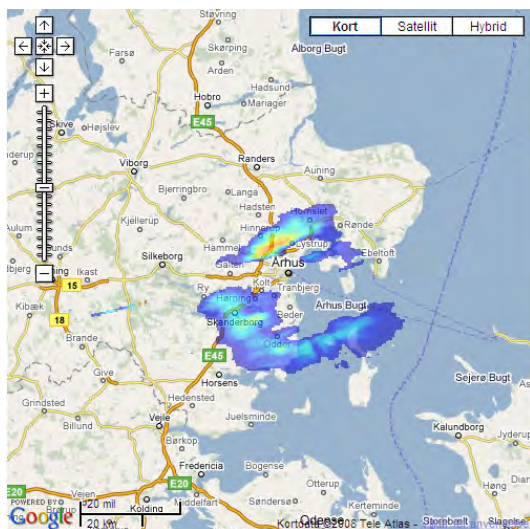


Figur 6.3.d
Målt og simuleret niveau i Filmby bassinet. Den røde streg er det målte niveau.

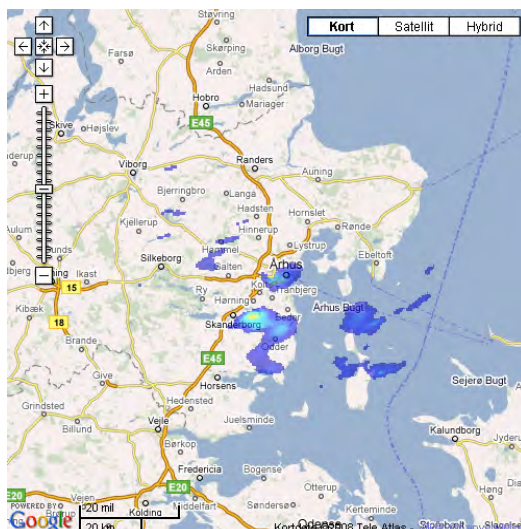
Systemet i brug

I det følgende vises et eksempel på systemet i brug, hvor der vises radar-billeder til to forskellige på hinanden følgende tidspunkter, samt tilsvarende screendumps fra STAR brugerfladen.

10:05

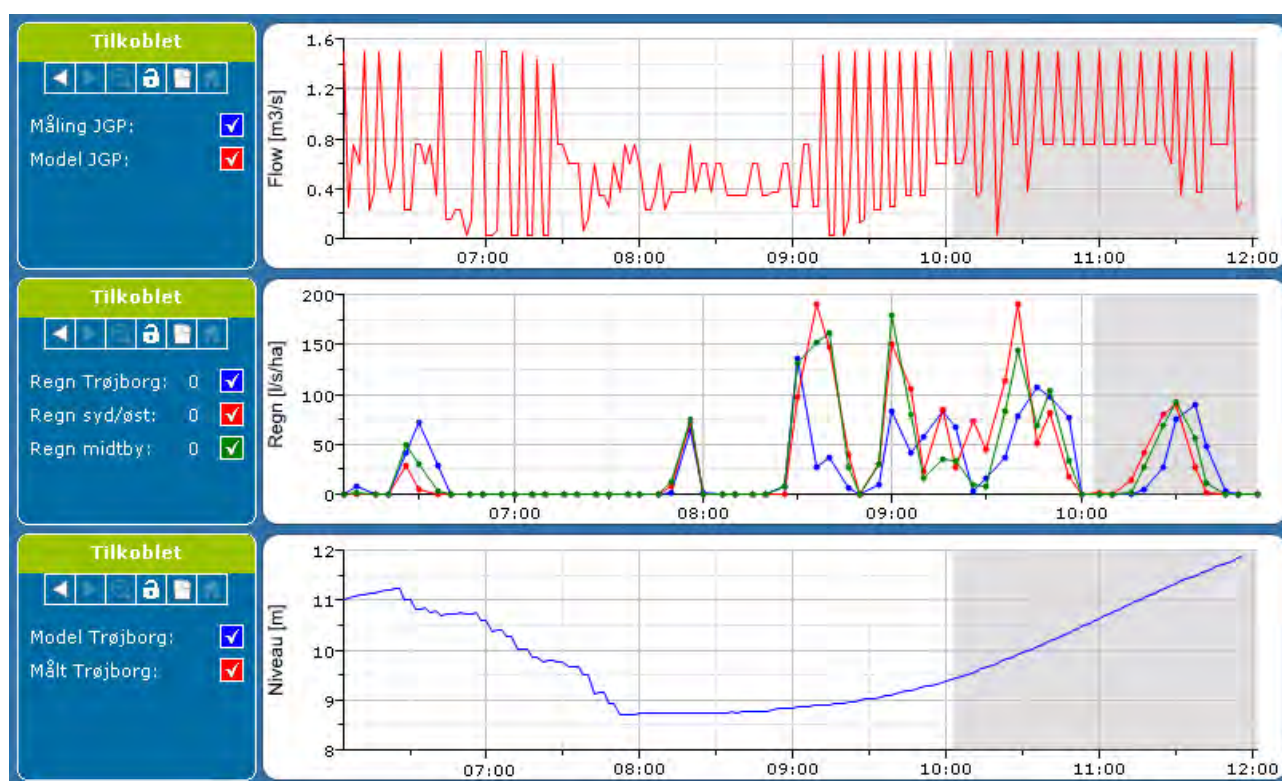


10:49



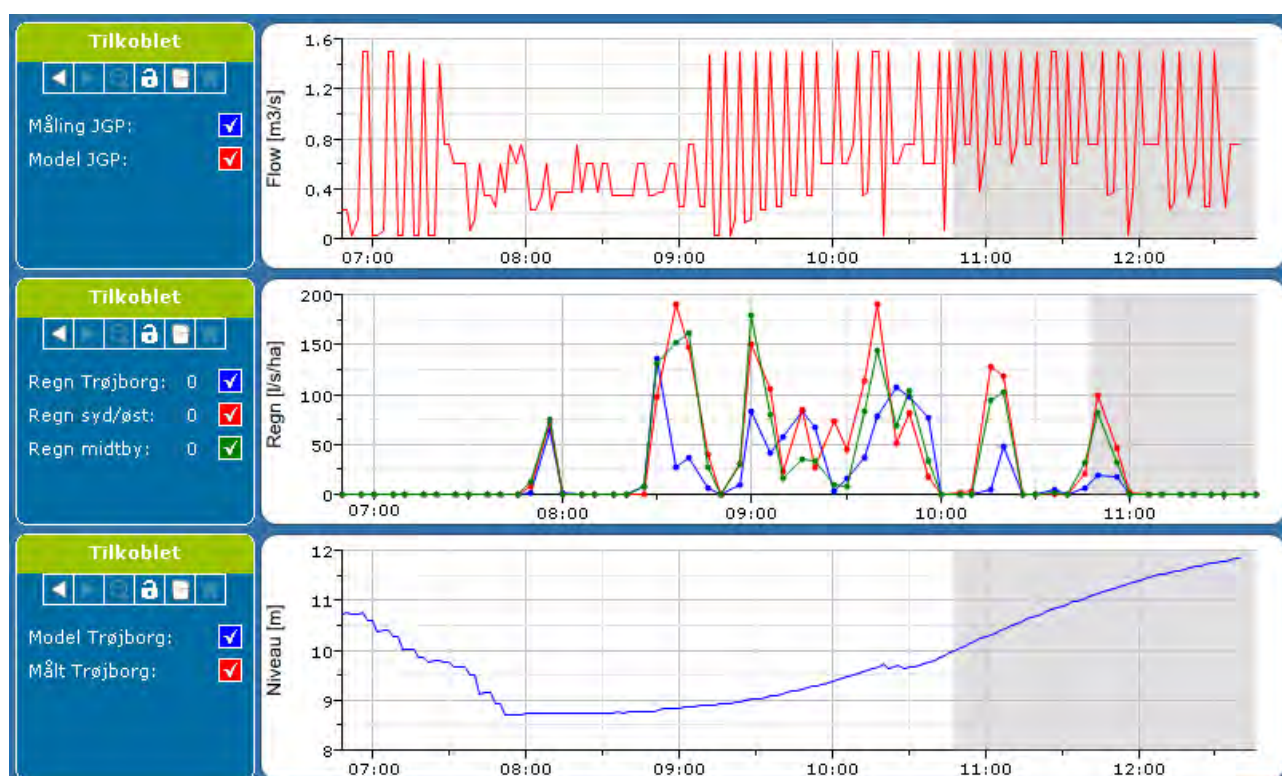
Figur 6.3.e
To radarbilleder fra Århus radaren med 40 minutter imellem.

10:05 – Der er en pause i nedbøren efter en længerevarende nedbørsperiode. Radaren estimerer dog, at der kommer en regnbyge af ca. 30 minutters varighed med maksimum klokken 10:30, og at niveauet i Trøjborg bassinet derfor stadig vil være stigende, se figur 6.3.f.



Figur 6.3.f
STAR brugerfladen fra klokken 10:05.

10:49 – Den prognosticerede regnbyge viste sig at være af kortere varighed end først estimeret og den mængde nedbør radaren estimerer der vil komme inden for det næste stykke tid, er ikke større end at stigningen i niveauet i Trøjborg bassinet aftager mod 12 m, se figur 6.3.g.



Figur 6.3.g
STAR brugerfladen fra klokken 10:48.

6.3.1

Vurdering og perspektiver

Da realtidsdata fra Århus kun har været tilgængelige i den sidste del af projektperioden har det ikke været muligt at overvåge regnprognosen i særligt mange regnhændelser. Men ud fra de få hændelser der har været, virker det som om af både radarindstillinger og placeringen af radaren er gunstige for fremtidige regnprognoser over Århus by. Der kan derfor laves fornuftige prognoser med ca. ½ times varsel, men usikkerhederne på længere prognosetider bliver følgelig større.

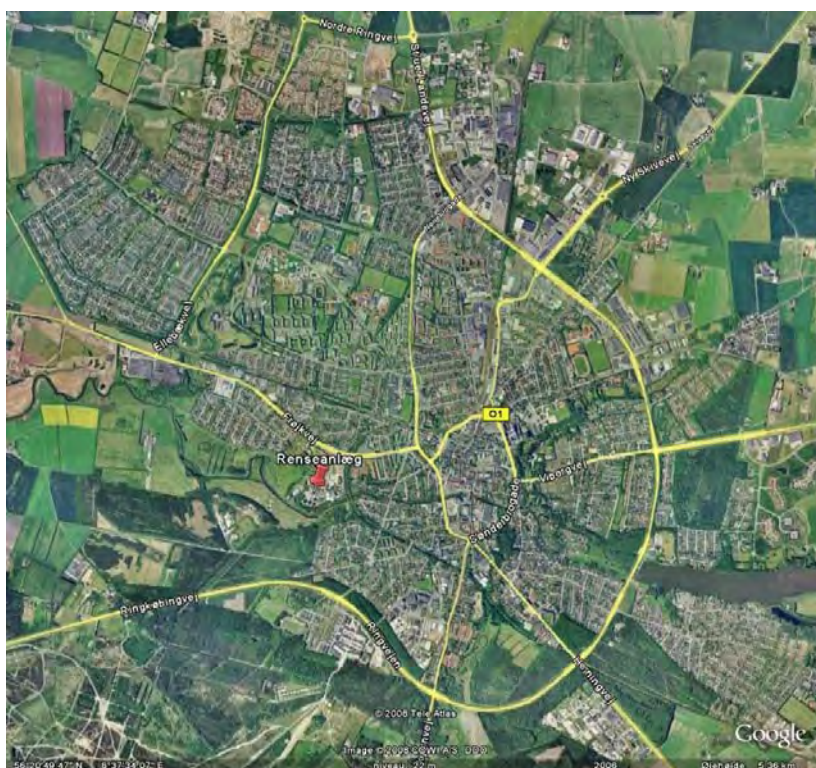
Radar baseret prognose af afstrømningen har flere perspektiver for spildevandssystemet i Århus. Det omfatter både en optimering af fyldning og tømning af bassiner, dynamisk valg af hvilket renseanlæg hvortil udvalgte deloplande skal afvande, omstilling til regnstyring på renseanlæggene og koordineret skylning med bassiner og ledninger. Det primære fokus i Århus er at optimere udnyttelsen af det eksisterende system, for dermed at undgå aflastninger og opnå så mange badevandsdage som muligt.

6.4

Holstebro

Vestforsyning i Holstebro har i øjeblikket fokus på optimering af processerne på Holstebro Renseanlæg. I den sammenhæng er det naturligt at overveje indførsel af regnstyring med tilhørende radar varsel. Holstebro adskiller sig fra de andre deltagere ved ikke selv at være udstyret med en X-bånd radar fra DHI. Løsningen har i stedet været at indhente radardata fra DMI's C-bånds radar.

Prognose punktet, som er anvendt i dette projekt, er tilløbet til Holstebro Renseanlæg, hvilket er angivet på figur 6.4.a.



Figur 6.4.a
Den røde nål angiver placeringen af renseanlægget i Holstebro.

6.4.1

Radaropsætning og resultater

De radardata der er anvendt i Holstebro stammer fra DMI's C-bånds radar placeret på Rønmø. Det har ikke i dette projekt været muligt af få realtidsdata fra DMI, og derfor er der anvendt 3 måneders data fra 2007, som i online-applikationen er antaget at være i realtid.

Rønmø-radaren er placeret ca. 130 km fra Holstebro, hvilket er lige i overkanten af den grænse for måling af kvantitativ nedbør på 75 km som DMI angiver. Det var også muligt af få data fra DMI's radar placeret i Sindal, men denne har en afstand på ca. 150 km til Holstebro. Desuden er Rønmø-radaren bedre placeret i forhold til, at de fleste nedbør i Danmark kommer

fra vest. Dermed er det den bedste placering i forhold til at prognosticere nedbøren over Holstebro.

Da rækkevidden for C-bånds-radarer er væsentligt længere end for X-bånds-radarer, er det muligt at lave en længerevarende prognose for nedbøren. Det er derfor valgt at prognosticere 120 min. med et tidsskridt på 10 min.



Figur 6.4.1.a
Dansk Meteorologisk Instituts radar på Rømø (DMI 2008)

Tabel 3 Specifikationer for Rømø-radaren

| | |
|-----------------------------|---|
| Frekvens | 5.625 GHz |
| Bølgelængde | 5.0 cm |
| Udgangseffekt | 250 kW |
| Rækkevidde | 240 km |
| Stedsopløsning | 2000 x 2000 m |
| Tidsopløsning | 10 min |
| Vertikale skanningsvinkler* | 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.4, 4.5, 8.5, 13.0, 15.0 |
| Ejer | Dansk Meteorologisk Institut |
| Driftsansvarlig | Dansk Meteorologisk Institut |
| Fabrikat | Ericsson/ECC |
| Placering | Rømø |
| Koordinat | UTM Zone 32 (E 471384, N6114077) |
| Driftstid i projektet | 1. juni 2007 – 31. aug. 2007 |
| Datastatus | Data kalibreret |

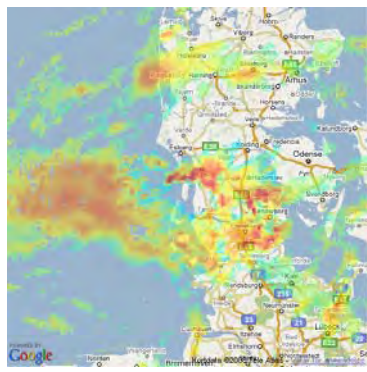
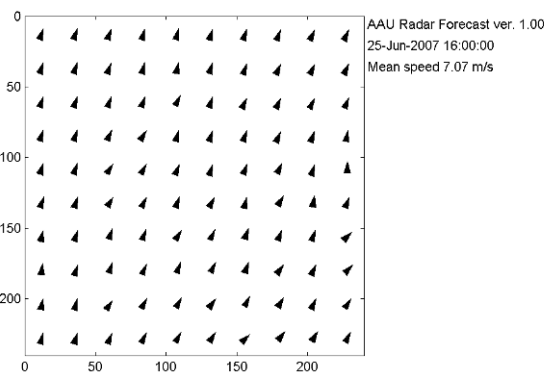
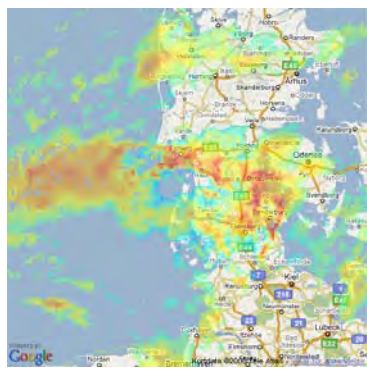
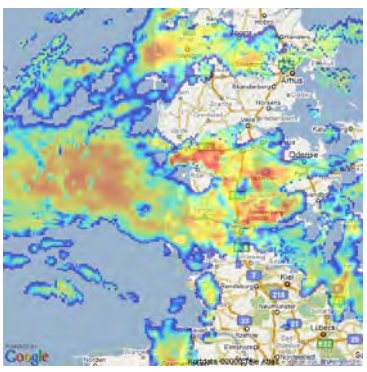
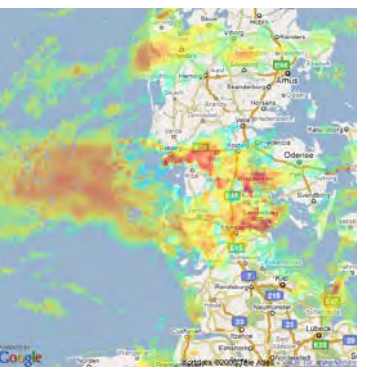
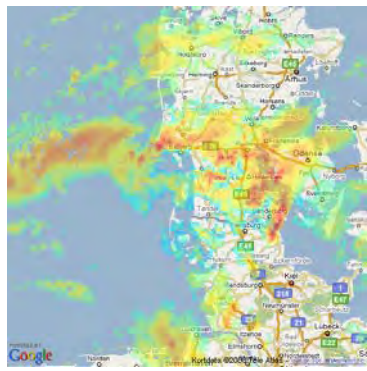
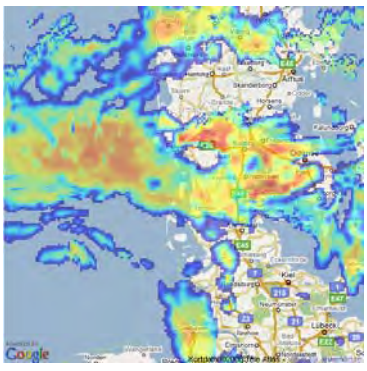
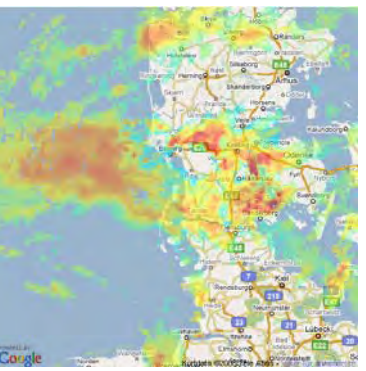
* DMI's radar skanner i flere vertikale vinkler modsat de lokale radarer som skanner med én vertikal vinkel. DMI's data repræsenterer derfor et volumen af atmosfæren. Dette volumen opdeles i et antal såkaldte cappilag, og de data der anvendes i dette projekt er et udtræk af det nederste cappilag (tættest ved jordoverfladen)

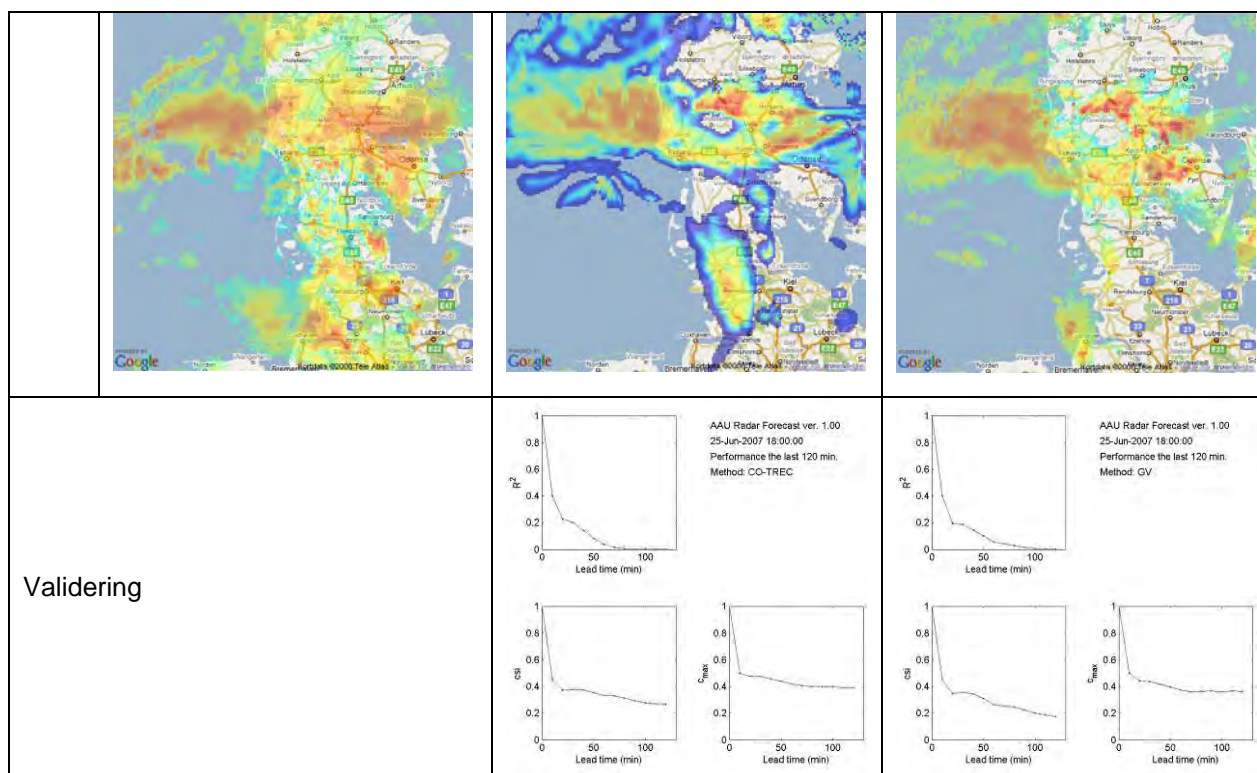
Kalibreringen af Rømø radaren er foretaget af DMI. Denne bygger på et empirisk (Marshall-Palmer) udtryk for sammenhængen mellem radarreflektivitet (Z) og regnintensitet (R), Overgaard (2004):

$$Z = A \cdot R^b$$

A og b er kalibreringskonstanter.

Der er for C-bånd-radarer ikke behov for afstandskorrektion af de målte reflektiviteter, dvs. at de målte reflektiviteter kan omsættes direkte til en regnintensitet.

| Observeret – 25. juni 2007 kl. 16.00 | | CO-TREC vektorer | |
|--------------------------------------|---|--|---|
| 0 min |  |  | |
| | | Prognose: CO-TREC | Prognose: GV |
| 30 min |  |  |  |
| 60 min |  |  |  |
| 120 min | | | |



Figur 6.4.1.b
Holstebro – 25. juni 2007 kl 16.00 (Kort er fra Google Maps)

I det valgte resultateksempel fra Rømø-radaren vises en højintensiv front, som bevæger sig ind over Danmark fra syd-sydvest. I figur 6.4.1.b er radarbillederne beskåret, således det er tydeligere at se nedbøren over Holstebro. Det ubeskårede radarbillede fra første tidsskridt vist på figur 6.4.1.c.

For at frafiltrere støj er de mindste regnintensiteter frasorteret i de observerede radardata. Da der i CO-TREC-prognosen foretages en stedslig midling er dette grunden til at de prognosticerede radardata også viser lave (mørkeblå) værdier.

På grund af forholdsvis ensrettede flytningsvektorer giver GV og CO-TREC i dette eksempel sammenlignelige resultater.

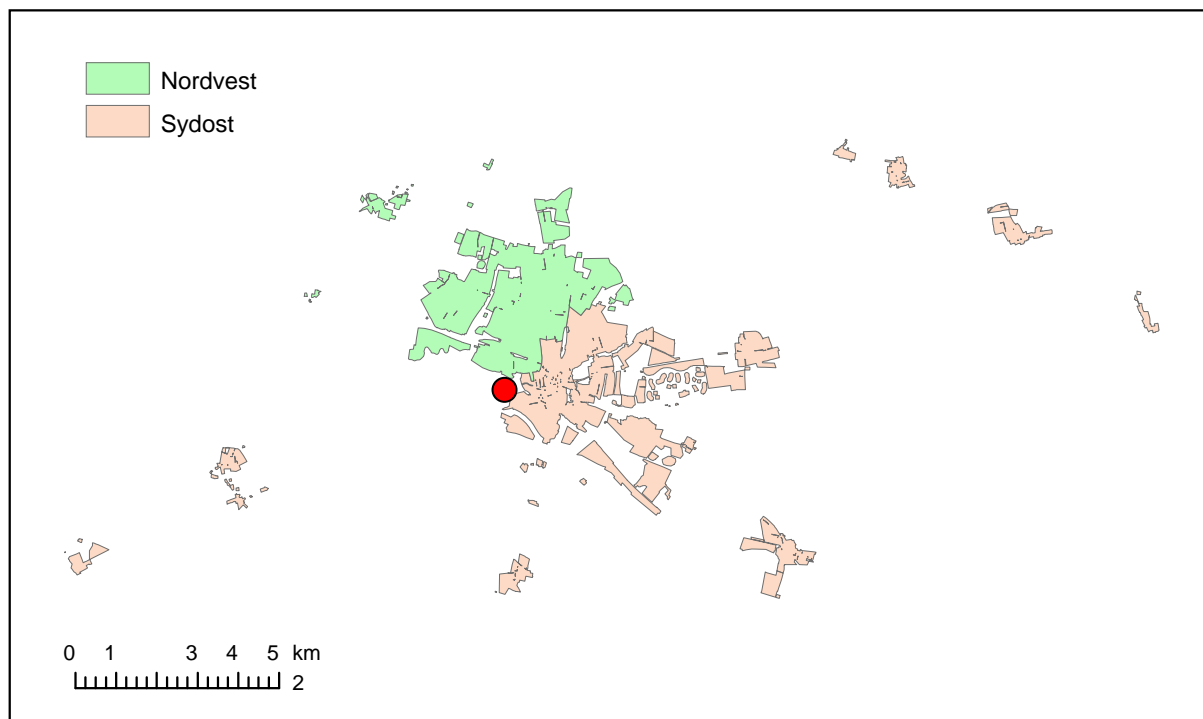


Figur 6.4.1.c
Ubekåret radarbillede fra den 25. juni 2007 kl. 16.00

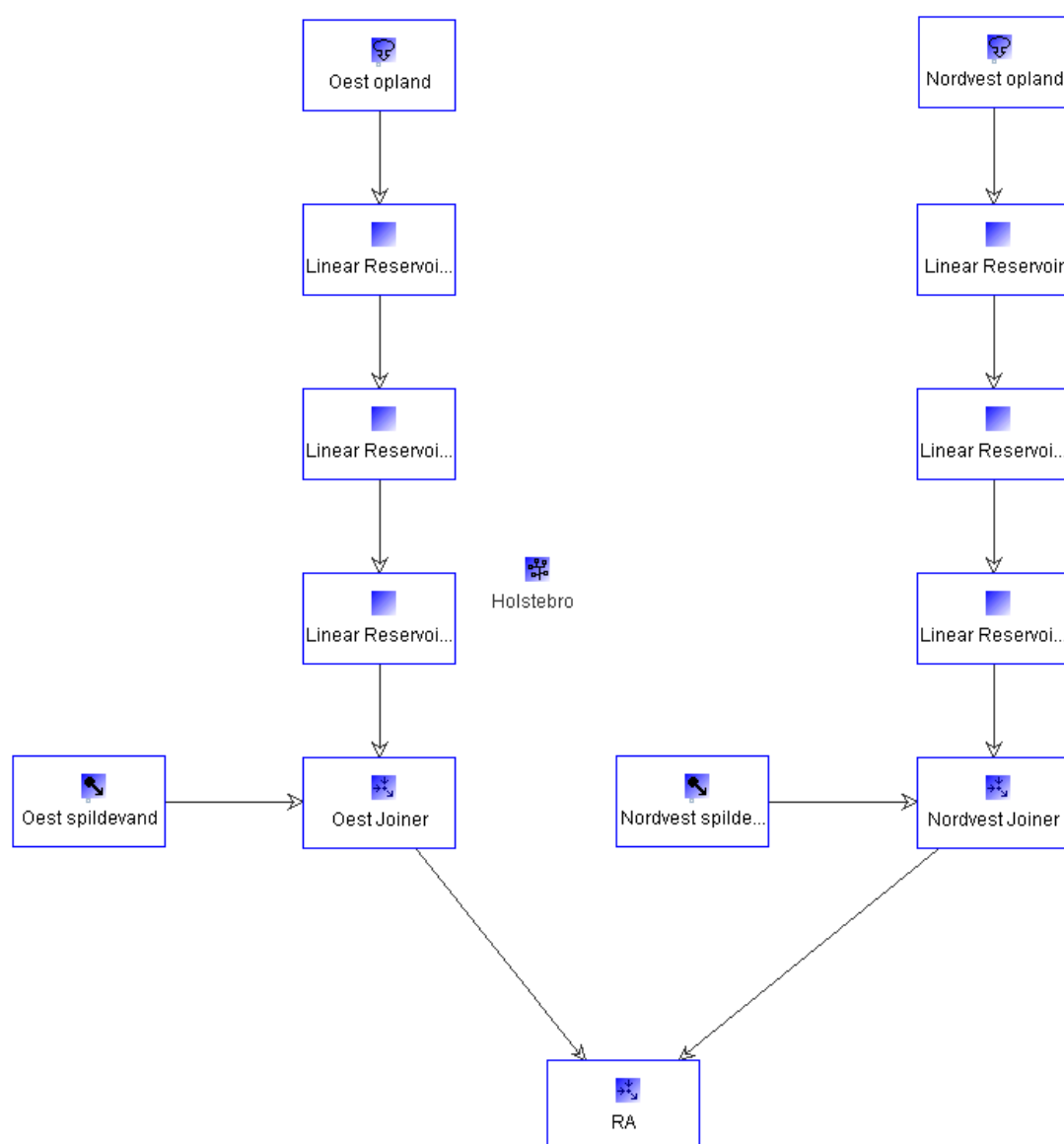
6.4.2

Opbygning af afstrømningsmodel og resultater

Modellen er opbygget så den simulerer tilstrømningen til renseanlægget fra de hele Holstebro og omegn. Hele oplandet er del ind i to deloplande, se figur 6.4.2.a. En oversigt over WaterAspects modellen ses i figur 6.4.2.b. Historiske data for tilløbet til renseanlægget fra hvert af de to oplande har været tilgængelige, hvorfor modellen er kalibreret imod disse.



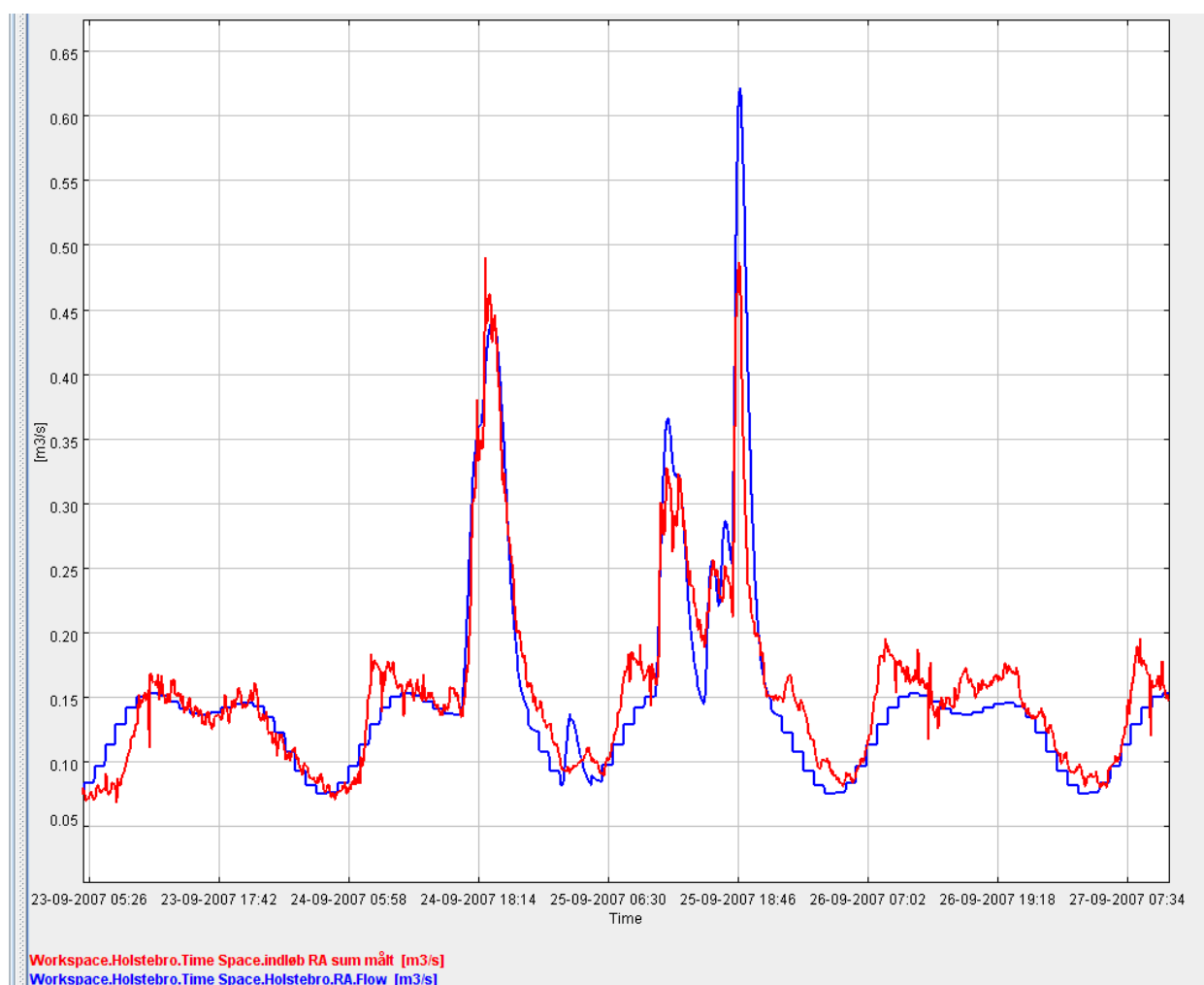
Figur 6.4.2.a
De to oplande for Holstebro. Den røde prik angiver prognosepunkt med de to kalibreringspunkter.



Figur 6.4.2.b
Oversigt over WaterAspects modellen for Holstebro.

Kalibrering

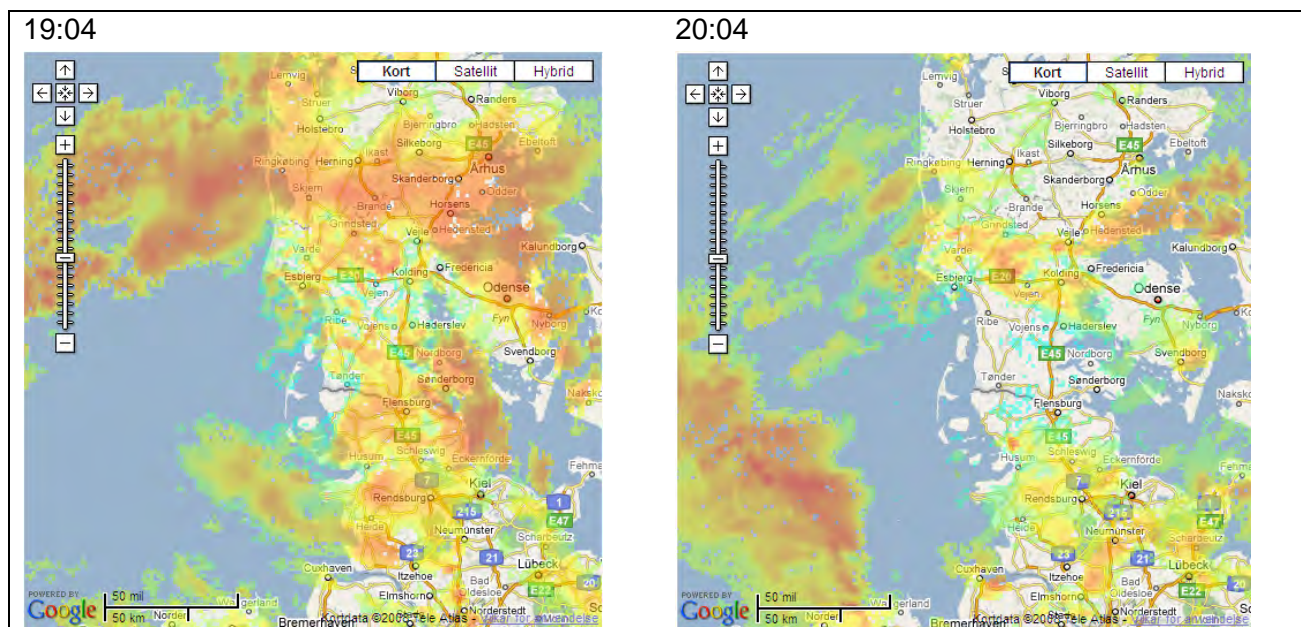
Modellen er kalibreret ud fra historiske måledata for de to tilløb (øst/vest) til renseanlægget, for september måned 2007. Vandmængderne i de to tilløb er omtrent lige store. Dette har været tilgængeligt separat for begge oplande. Figur 6.4.2.c viser den målte og modellerede tilstrømning til renseanlægget, beregnet som summen af tilstrømningen fra de to oplande.

**Figur 6.4.2.c**

Målt og modelleret indløb til renseanlægget. Den røde linje repræsenterer det målte.

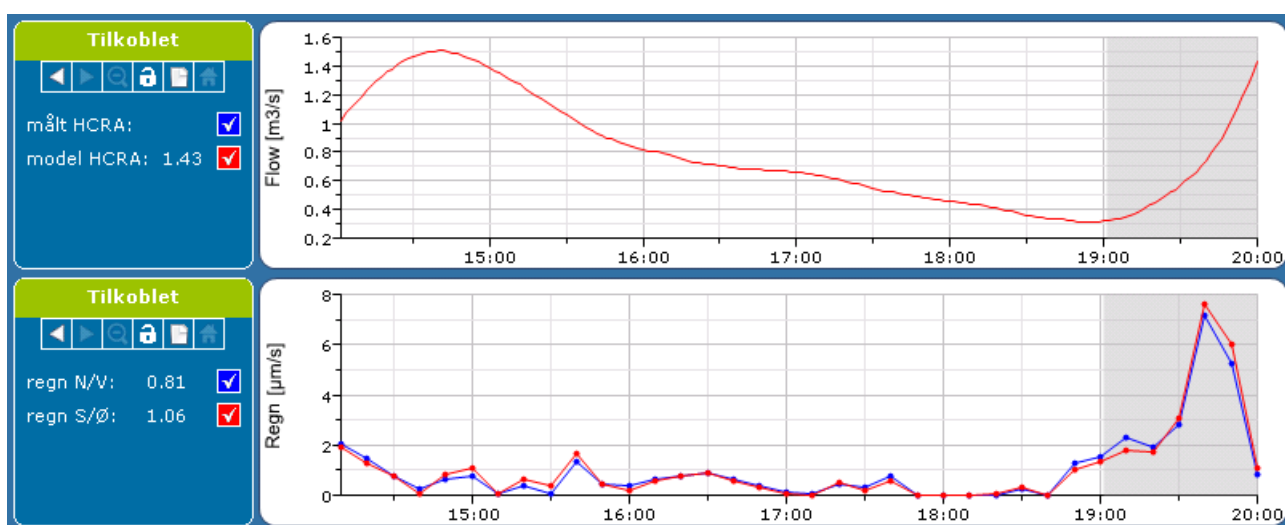
Systemet i brug

I det følgende vises et eksempel på systemet i brug, hvor der vises radar-billeder til to forskellige på hinanden følgende tidspunkter, samt tilsvarende screendumps fra STAR brugerfladen.



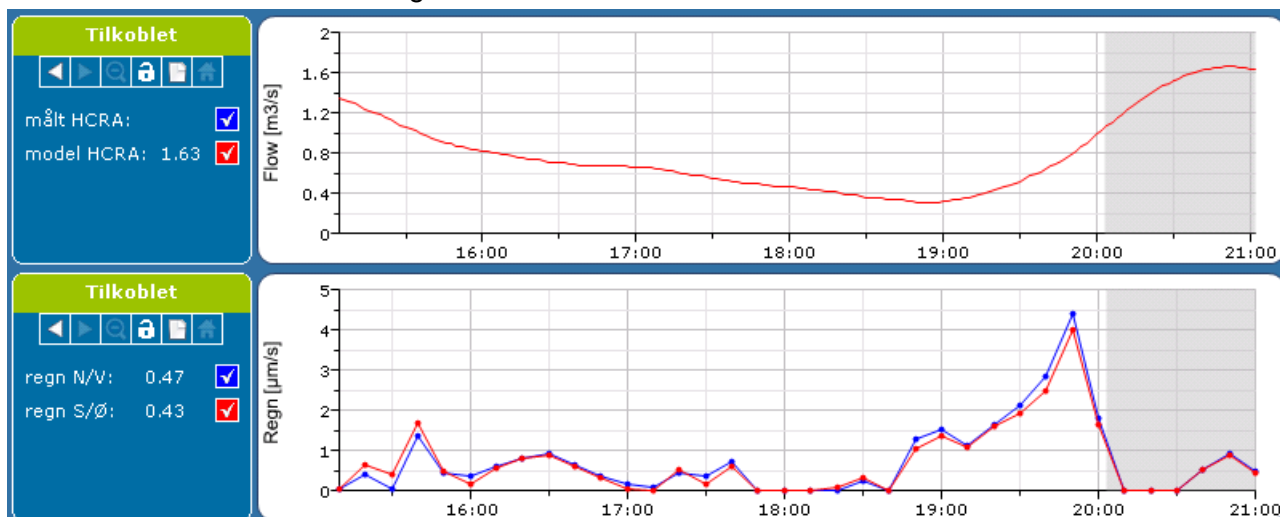
Figur 6.4.2.d
To radarbilleder fra Rømø radaren med 60 minutter imellem.

19:04 – Radar prognosen estimerer, at der vil komme et nedbørsområde med en sådan dybde og intensitet at tilløbet til renseanlægget stiger til over $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ omkring klokken 20, se figur 6.4.2.e.



Figur 6.4.2.e
STAR brugerfladen fra klokken 19:04.

20:04 – Nedbørsområdet blev noget svagere end prognosticeret, og tilløbet til renseanlægget kl. 20 var således kun steget til 1.0 m³/s. Tilløbet prognosticerer dog til at være stigende til over 1.6 m³/s mod klokken 21, se figur 6.4.2.f.



Figur 6.4.2.f
STAR brugerfladen fra klokken 20:04.

6.4.3

Vurdering og perspektiver

Prognoserne viser, at det med Rømø-data er muligt af prognosticere fornuftigt ca. en time frem i tiden, men prognosen bliver mere usikker mellem 60 og 120 min. Det er derfor tydeligt at på grund af DMI's radars større rækkevidde er det muligt af prognosticere længere frem i tiden i forhold til hvad det er muligt med LAWR-radarene. Det vurderes dog at afstanden mellem Rømø og Holstebro er for stor til at have pålidelige kvantitative estimater af nedbøren. Det vil i midlertidig være muligt at opnå bedre radarkvalitet når DMI's nyeste radar nær Skanderborg bliver operativ i starten af 2009. Der skal dog arbejdes på at gøre radarsystemerne tilgængelige i realtid, således at radardata kan bruges direkte i prognosen. Netop dette er et af del-elementerne i Aalborg Universitets og Krügers planer for fremtidig arbejde med radartechnologien. Et alternativ vil være at opstille en lokalradar nær Holstebro, hvorved der vil kunne opnås en bedre kvantitativ og spatiel beskrivelse af nedbøren i lokalområdet.

6.5

Hvidovre

Det valgte prognosepunkt i Hvidovres afløbssystem er tilløbet til Muslingevej pumpestation, hvorfra der under kraftigt regn aflastes til Kalveboderne. Det forventes at en prognose af tilstrømningen til dette punkt i afløbssystemet vil give mulighed for bedre at udnytte den volumen der ligger i pumpe-umpen og de tilstødende ledninger ved en hensyntagen til forholdene nedstrøms for pumpestationen. I dag pumpes det tilstrømmende vand hurtigst muligt videre i systemet. Et bedre kendskab til, hvor meget tilstrømning der egentligt vil komme til pumpeumpen i den nære fremtid, vil give mulighed for at tilbageholde vand der ellers vil aflaste i de nedstrøms byggeværker.

**Figur 6.5.a**

Den røde nål angiver placeringen af Muslingevejs pumpestation.

6.5.1

Radar opsætning og resultater

Radaren i Hvidovre er placeret tæt på det modellerede opland og danner derfor, når radaren er blevet kalibreret, et godt kvantitativt datagrundlag for afstrømningsmodellering.



Figur 6.5.1.a
Vejrradaren i Hvidovre placeret på et tag med clutterfence rundt om radaren
(DHI 2008)

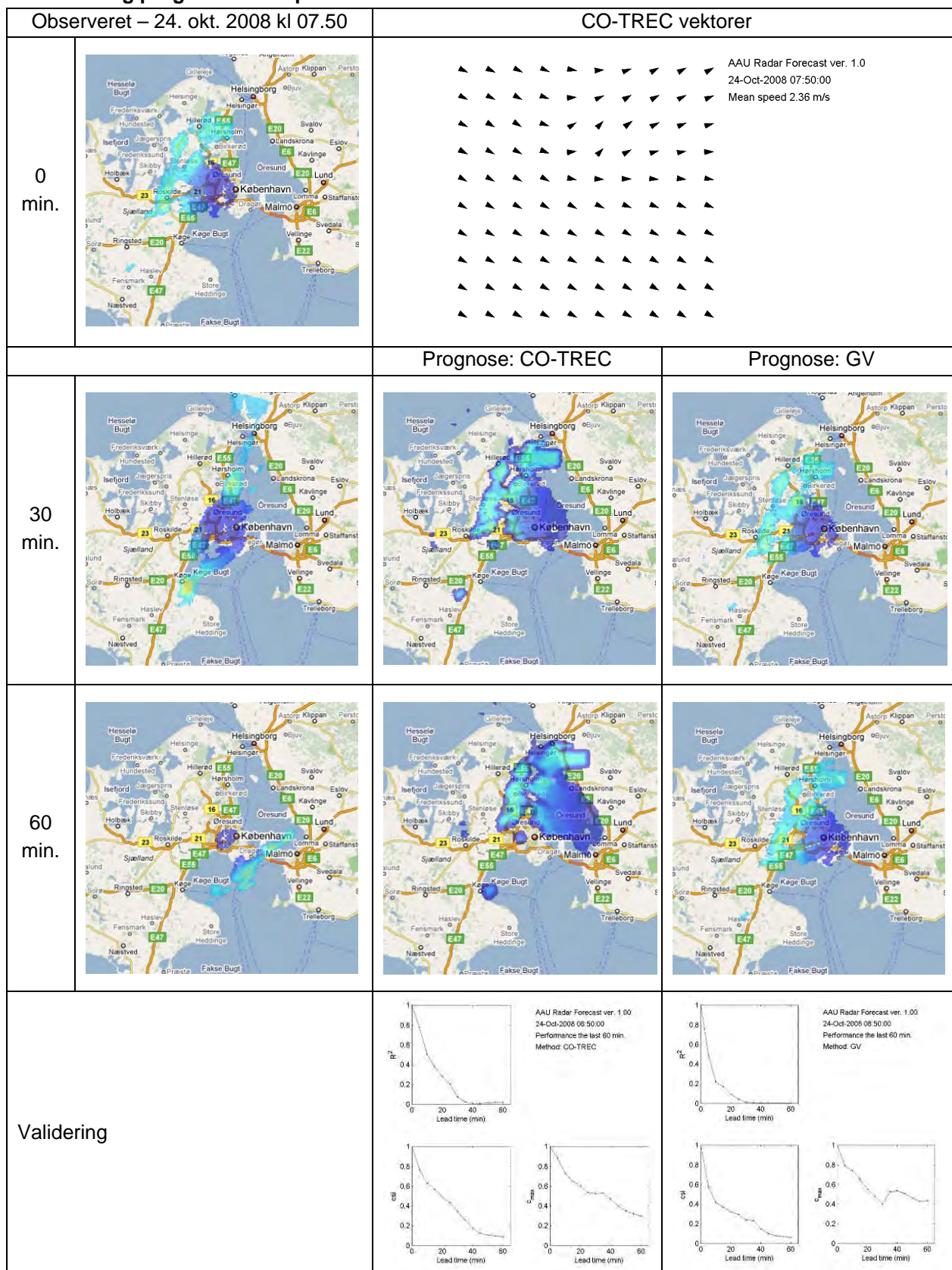
Tabel 4 Specifikationer for Hvidovre-radaren

| | |
|------------------------------|------------------------------------|
| Frekvens | 9,4 GHz |
| Bølgelængde | 3,2 cm |
| Udgangseffekt | 25 kW |
| Rækkevidde | 60 km |
| Stedsopløsning | 500 x 500 m |
| Tidsopløsning | 5 min (midlet) |
| Horisontal stråle- bredde | 0,95° |
| Vertikal strålebredde | ±10° |
| Ejer | Hvidovre Forsyning |
| Driftsansvarlig | DHI |
| Producent | DHI |
| Fabrikat | Furuno FAR 2127 |
| Placering | Avedøre Havnevej 37, 2650 Hvidovre |
| Koordinat | UTM Zone 33 (E 339985, N 6170506) |
| Igangsat i projektet | 8. sep. 2008* |
| Datastatus | Kalibrering er undervejs |

* Der er i projektet modtaget data fra Hvidovre-radaren fra den 8. september 2008, men problemer med radaren har betydet at der først har været brugbare data fra den 21. oktober 2008

De data der i dette projekt er anvendt fra Hvidovre er ikke kalibreret ind efter regnmålerdata, da dette ligger uden for rammerne af dette projekt at gennemføre kalibreringen. Hermed er der ligeledes ikke foretaget nogen afstandskorrektion på radardataene. De data der anvendes i afstrømningsmodellen er derfor de rå radardata. For denne del af projektet har dette dog ikke den store betydning, så længe der ikke sammenlignes direkte med SRO data.

Resultat- og prognoseeksempel



Figur 6.5.1.b

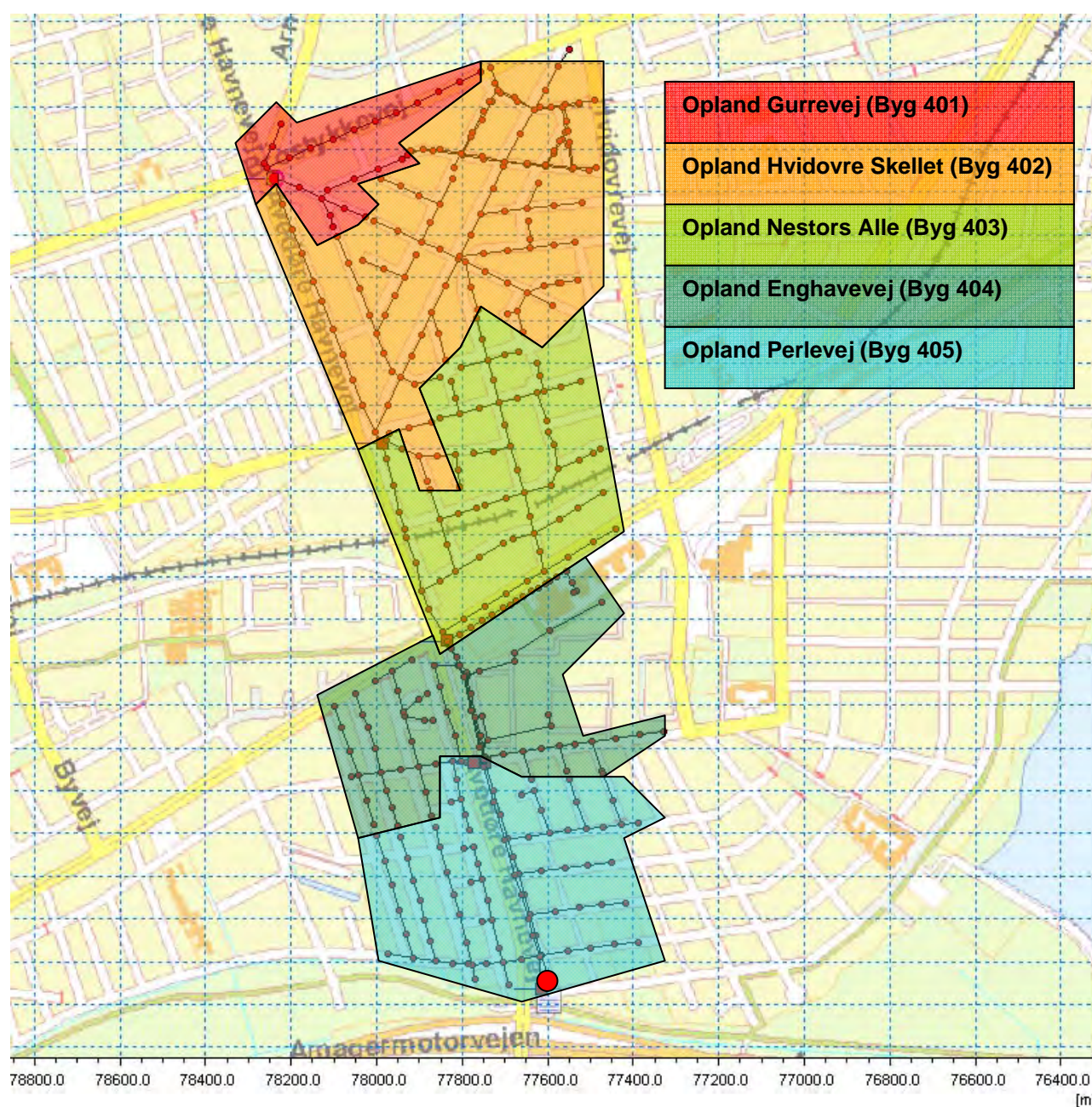
Hvidovre - 24. oktober 2008 kl. 07:50 (Kort er fra Google Maps)

Da det først har været muligt at få brugbare realtidsdata fra Hvidovre sent i projektperioden samt problemer med støj på radardataene har det været vanskeligt at finde et godt eksempel. Det er tydeligt at hverken CO-TREC eller GV prognoserne præsterer særlig godt i det valgte eksempel, hvilket skyldes den grove filtrering der er foretaget på datasættet (Se følgende afsnit).

6.5.1.1

Opbygning af afstrømningsmodel og resultater

Det modellerede opland for Hvidovre er langt mindre end for de andre modeller, og da der ikke har været større mængder historiske data til rådighed, er modellen lavet med udgangspunkt i en eksisterende opdateret Mouse model over oplandet. De enkelte underoplande er fundet ved *backwards flow trace* fra hvert af de fire bygværker opstrøms for pumpestationen, samt fra pumpestationen selv. En væsentlig del af oplandet til pumpestationen afstrømmer til bassinet ved bygværk 402. Herfra er der jævnlige overløb til Damhus-åen, hvilket vil sige ud af modellen. For blandt andet at tage højde for dette, er arealet af de befæstede oplande, samt bassinvolumener og udløbskapaciteten fra bygværk 402, som udgangspunkt taget fra Mouse modellen. De to nedenstående figurer viser henholdsvis oplandende og WaterAspects modellen for Hvidovre.

**Figur 6.5.1.1.a**

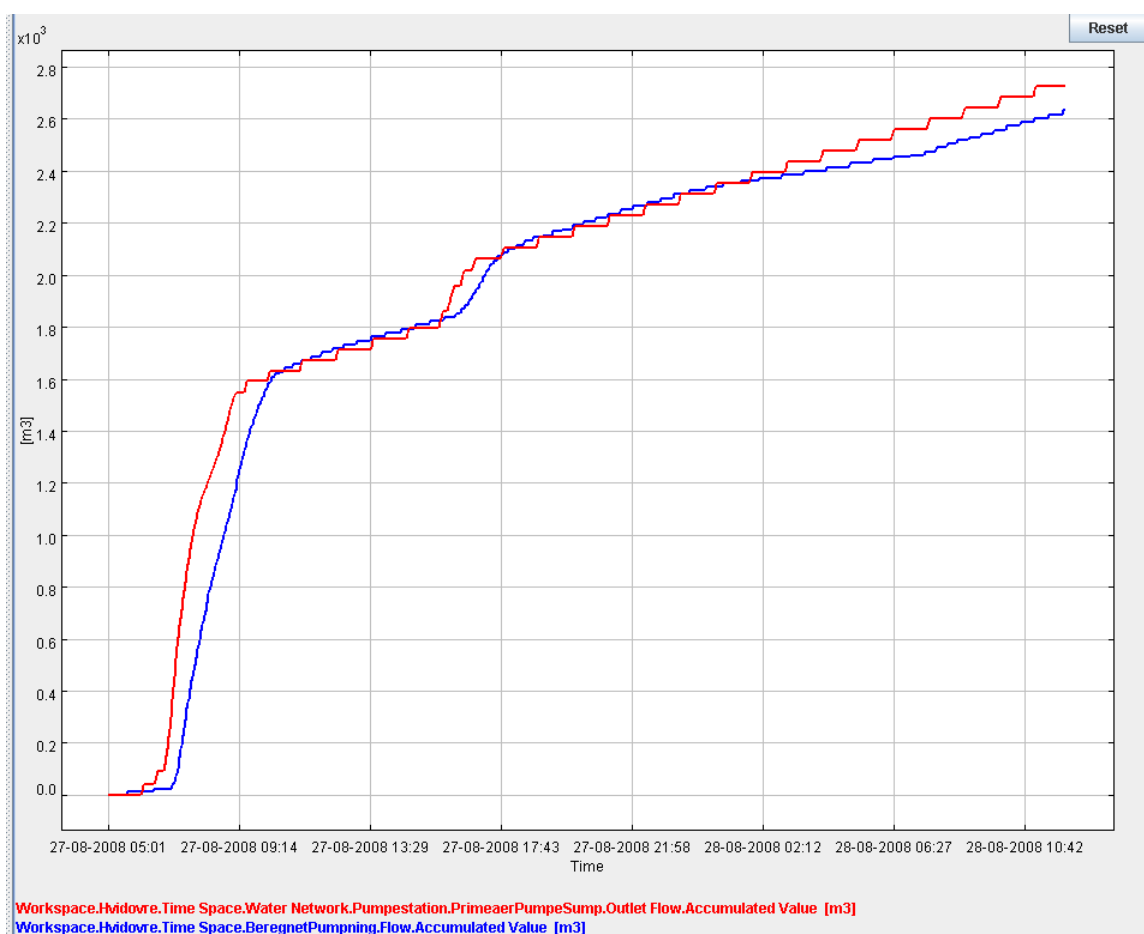
De fem oplande i Hvidovre. Den røde prik angiver prognose og kalibreringspunktet.



Figur 6.5.1.1.b
Oversigt over WaterAspects modellen for Hvidovre.

Kalibrering

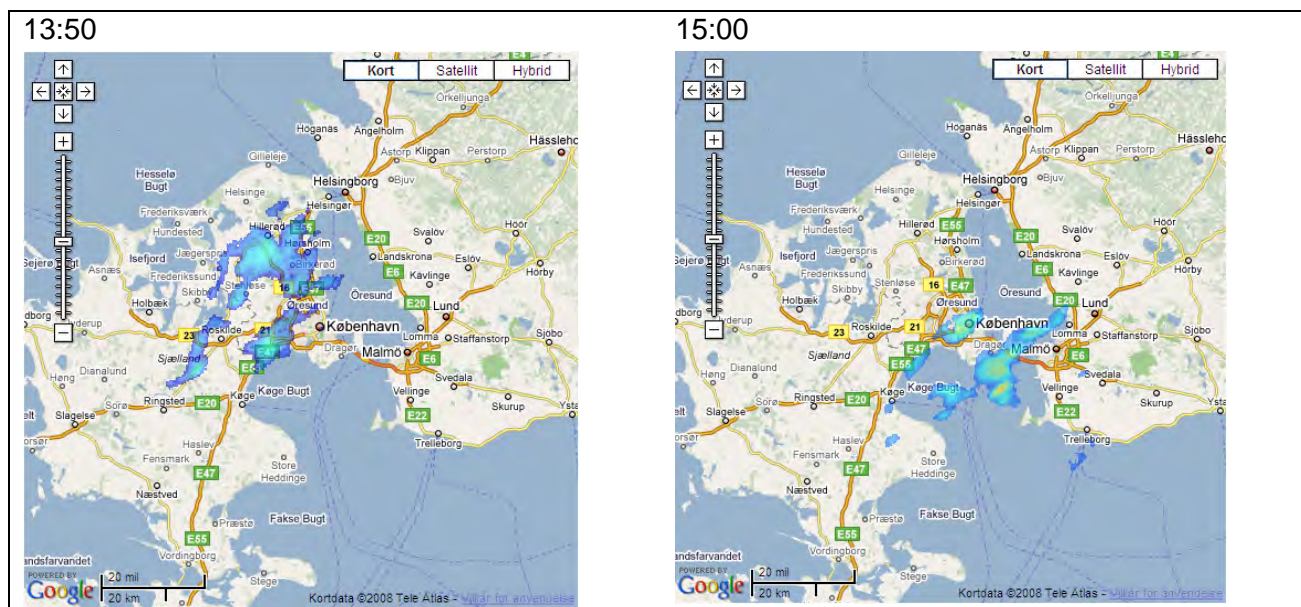
Da der ikke har været niveau eller flowdata til rådighed er modellen kalibreret ud fra strømforbruget for de enkelte pumper på Muslingevejens pumpestation. Dette er gjort for hændelsen d. 27/8 2008. Data fra hændelsen d. 11/7 var også tilgængelige, men der var så stor variation i den målte nedbør imellem nabo SVK stationer, at dataene derfra ikke kunne antages at være en pålidelig nedbørsbeskrivelse over hele oplandet. Figur 6.5.1.1.c viser den målte og modellerede akkumulerede afstrømning fra Muslingevejens pumpestation for kalibreringshændelsen.

**Figur 6.5.1.1.c**

Den akkumulerede afstrømning fra Muslingevejens pumpestation under hændelsen d. 27/8 2008. Den røde streg angiver det modellerede og den blå angiver den beregnede afstrømning ud fra pumpenes strømforbrug.

Systemet i brug

I det følgende vises et eksempel på systemet i brug, hvor der vises radar-billeder til to forskellige på hinanden følgende tidspunkter, samt tilsvarende screendumps fra STAR brugerfladen.



Figur 6.5.1.1.d

To radarbilleder fra Hvidovre radaren med 70 minutter imellem.

13:50 – Radaren estimerer, at det vil regne kraftigt i den næste times tid, hvilket vil resultere i en tilstrømning til pumpestationen, der topper med ca. $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ klokken 14.25, se figur 6.5.1.1.e.

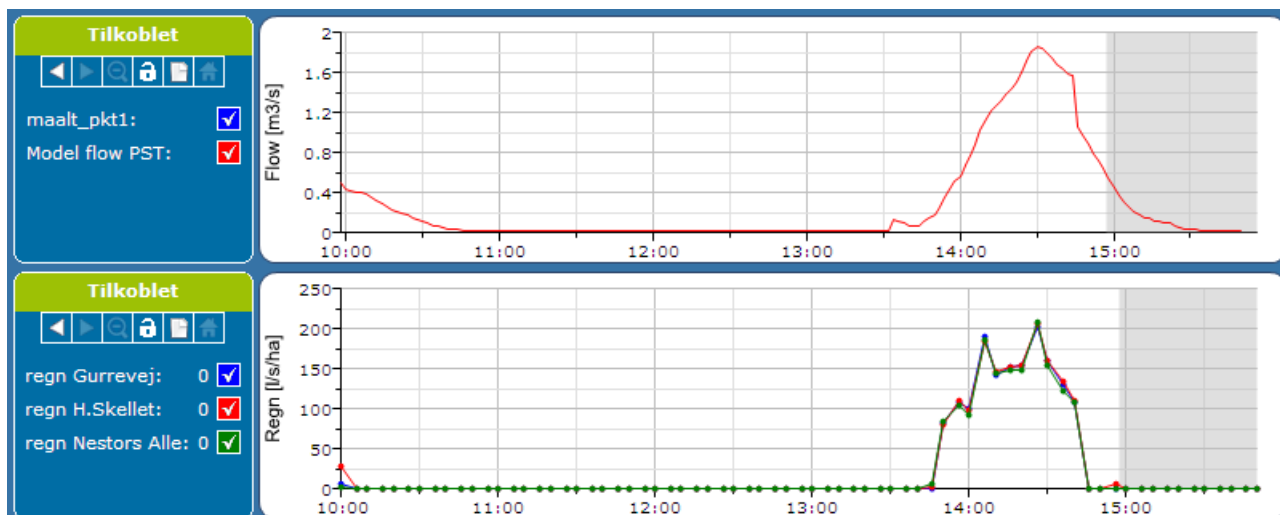


Figur 6.5.1.1.e

STAR brugerfladen fra klokken 13:50.

14:58 – Hændelsen viste sig at være kraftigere end først estimeret af radaren. Dette skyldes sandsynligvis at radaren endnu ikke er kalibreret, hvilket

gør at nedbøren typisk vil virke kraftigere tæt på radaren. Tilstrømningen til pumpestationen toppede med $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ klokken 14.30, se figur 6.5.1.1.f.



Figur 6.5.1.1.f
STAR brugerfladen fra klokken 15:00.

6.5.2

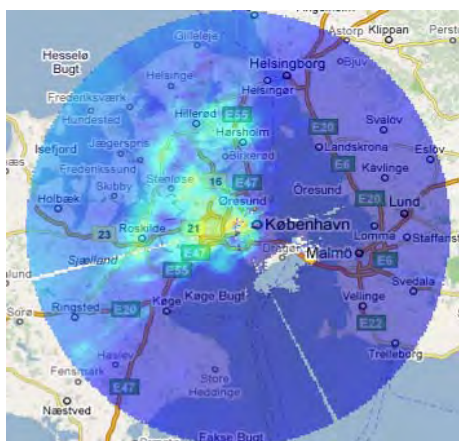
Vurdering og perspektiver

Der har ved Hvidovre-radaren været en del problemer med indstillingen af radaren, herunder forstærkningen af signalet under regn. Dette kan ses på figur 6.5.2.a, hvor det rå radarbillede fra den 24. oktober 2008 kl. 07:50 er vist. I prognosen er en del af dette støj frafiltreret, men det har været vanskeligt at fastlægge et konstant niveau for frafiltreringen, dels pga. en kort periode med realtidsdata samt svingende kvalitet af dataene. På figur 6.5.2.b er vist et andet eksempel på støj fra Hvidovre-radaren. Disse værdier, som ikke repræsenterer nedbør, har ikke været mulige at frafiltrere og da de har antaget meget høje værdier har disse påvirket den globale flytningsvektor i GV-prognosemodellen.

Da støjen i høj grad påvirker regnprognosen har denne derfor, som også præsenteret i eksempelet, været af svingende kvalitet, og det må derfor konkluderes at for Hvidovres vedkomne er der brug for mere tid (og nedbør) til at lave en ordentlig vurdering af prognosen.

Som tidligere beskrevet giver den opstillede prognose mulighed for optimering af styring af Muslingevej pumpestation, hvilket ville kunne føre til en reduktion af både antal og mængde af aflastning til Kalveboderne. Der ønskes opretholdt badevands kvalitet i Kalveboderne og derfor er en optimeret udnyttelse af afløbssystemet og dets magasineringsvolumener af høj prioritet. Samtidigt ligger afløbssystemet i området generelt fladt og lavt,

hvilket giver en del udfordringer når vandet skal tilbageholdes. En global prognose baseret styring vil give mulighed for at optimere sammenstyringen af de forskellige deloplande og derigennem reducere antallet af aflastninger og minimere den samlede aflastede mængde. Radar prognosen har derved et stort potentiale i forhold til både at minimere udbygning af afløbssystemet for at opnå de nødvendige badevandsforhold og i forhold til at varsle til borger om uundgåelige oversvømmelser af ejendomme i området.



Figur 6.5.2.a Rådata fra den 24. oktober 2008 kl. 07:50



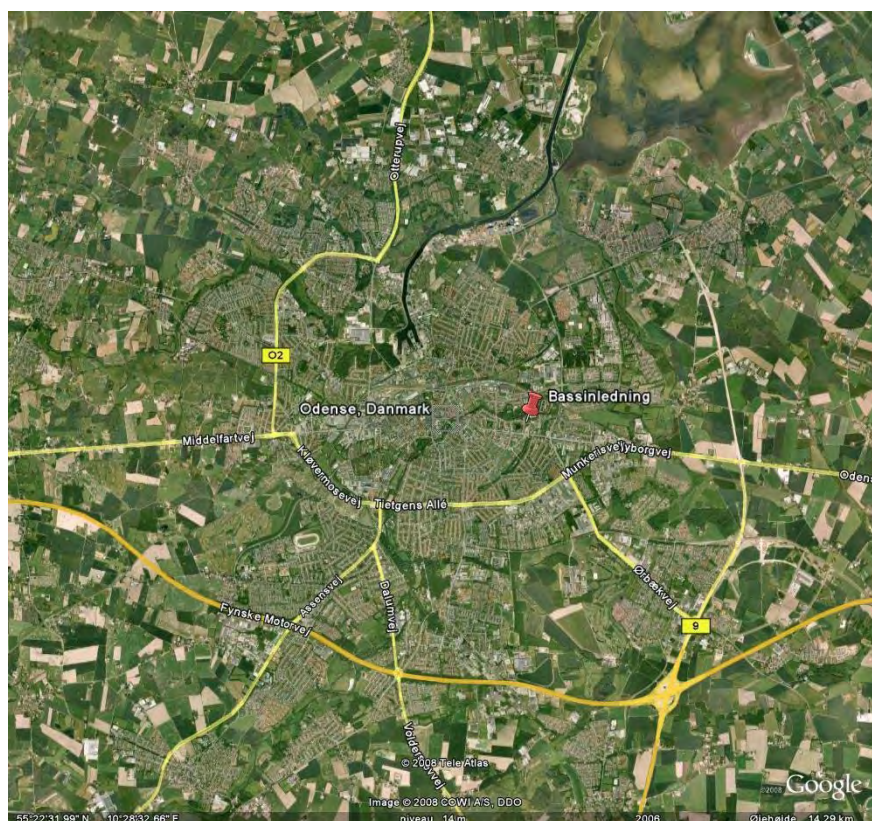
Figur 6.5.2.b Eksempel på støj (ground clutter), bl.a. vest for Hundested

6.6

Odense

Det valgte prognosepunkt i Odense er niveau i overløbsbygværket i den nordlige ende af den nyanlagte bassin-ledning ved Munkedammen, se figur 6.6.a. Ledningen er indrettet med spjæld, der har til formål at tilbageholde vandet i ledningen og derved undgå aflastninger til Odense Å i videst mulig omfang. Er der derimod risiko for oversvømmelser i oplande opstrøms for bassin-ledningen åbnes spjældene, for hurtigst muligt at få vandet ud af ledningen og få sænket vandspejlet i området. I en sådan situation er aflastning til Odense Å uundgåelig.

En prognose af vandspejlet ved overløbsbygværket og ved bygværkerne i bassin-ledningen kan indgå i en forbedret styring af spjældene i bassin-ledningen. Prognosen kan benyttes i styringen af spjældene til tidligere at identificere en reel oversvømmelsesrisiko og derved bedre kunne styre spjældene. Med mere forvarsling og sikkerhed for, hvor meget vandstanden i bassin-ledningen og de tilstødende oplande forventes at stige, forventes det at være muligt at undgå aflastninger i situationer, hvor der reelt ikke er nogen risiko for oversvømmelse.



Figur 6.6.a.
Den røde nål angiver prognosepunktet i Odense.

6.6.1

Radaropsætning og resultater

Odense-radaren er placeret i Lindved sydøst for Odense C med en afstand på ca. 6 km til Odense C, hvilket er en perfekt afstand i forhold til at kvantitativt at måle nedbørsintensiteter i hele Odense By.



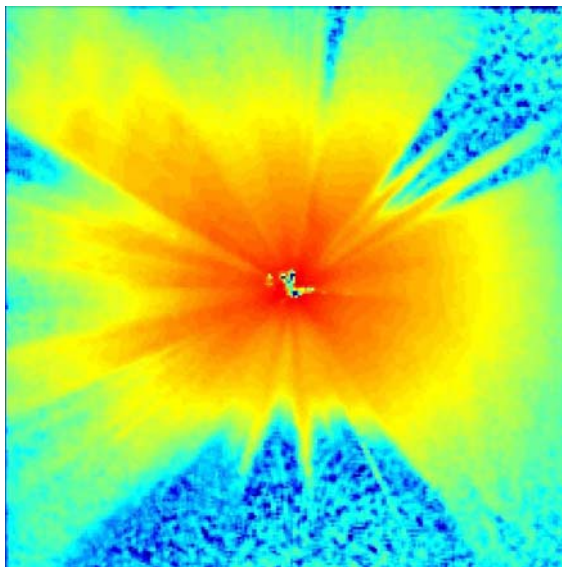
Figur 6.5.2.c
Odense-radaren

Tabel 5 Specifikationer for Odense-radaren

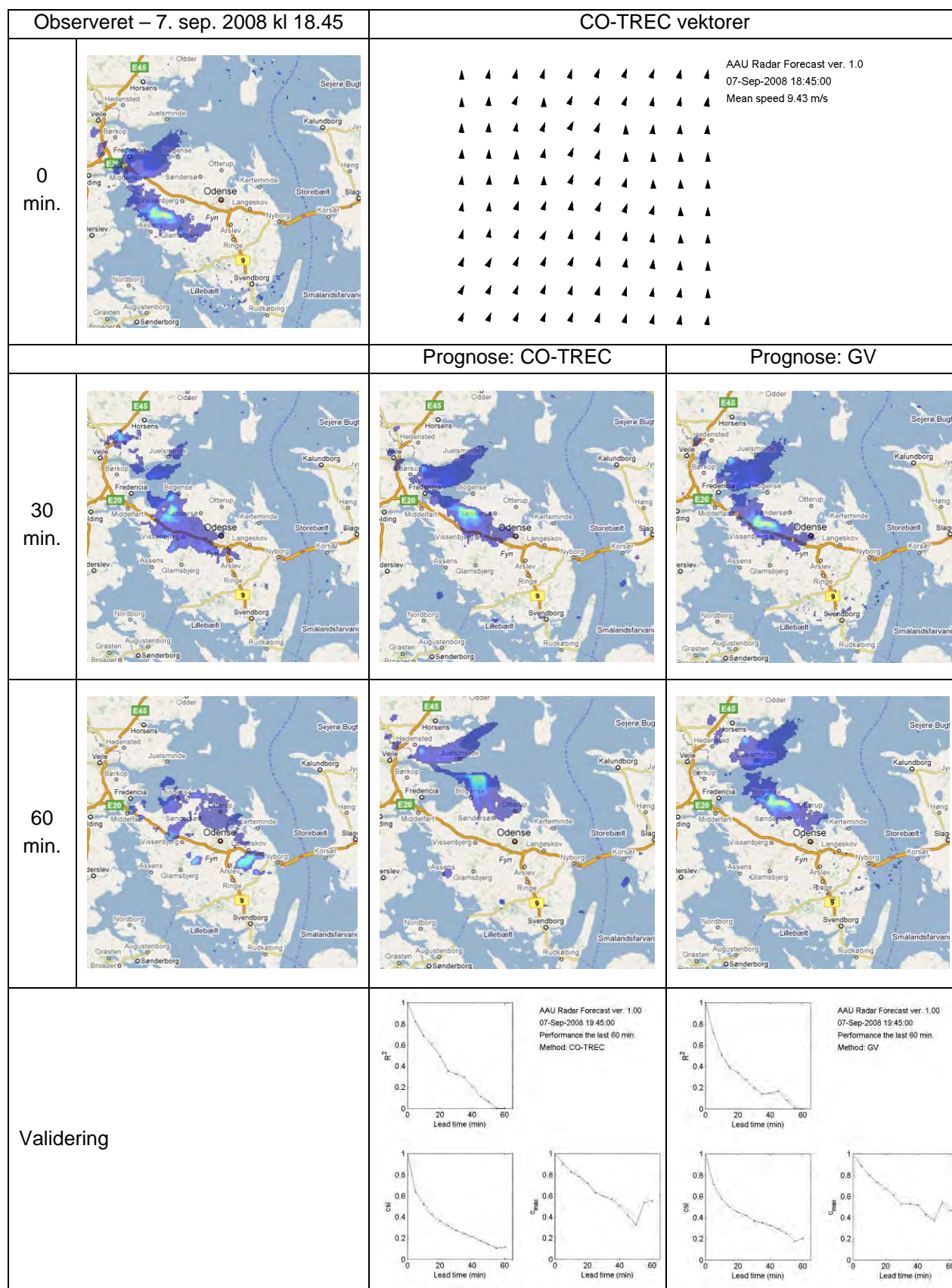
| | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Frekvens | 9,4 GHz |
| Bølgelængde | 3,2 cm |
| Udgangseffekt | 25 kW |
| Rækkevidde | 60 km |
| Stedsopløsning | 500 x 500 m |
| Tidsopløsning | 5 min (midlet over 1 min.) |
| Horisontal strålebredde | 0,95° |
| Vertikal strålebredde | ±10° |
| Ejer | Odense Vandselskab A/S |
| Driftsansvarlig | DHI |
| Producent | DHI |
| Fabrikat | Furono 1525 mrk 3 |
| Placering | Lindved (Odense) |
| Koordinat | UTM Zone 32 (E 589495, N 6133209) |
| Igangsæt i projektet | 23. marts 2008 |
| Datastatus | Kalibreret efter nedbørsmålere |

Odense-radaren adskiller sig fra de fire andre i projektet anvendte radarer ved at levere 1 minuts midlede data i stedet for midlet over 5. min som det er tilfældet ved den andre lokale radarer. Dette betyder at radarbillederne fremstår mindre langstrakte end de øvrige lokale radarer, men ellers har det ingen betydning for måling af nedbør eller nedbørsprognosen.

Kalibreringen af Odense-radaren er foretaget af PH Consult ved hjælp af de fem af spildevandskomiteens regnmålere, der står i Odense. Disse er placeret i afstande fra 3 km til 10 km fra radaren. Kalibreringen er lavet ud fra en meget jævnt fordelt ca. 15 mm dyb hændelse i foråret 2008, hvor alle fem SVK målere målte ca. samme dybde. Kalibreringen er en sumkalibrering, der er udført for hver pixel i radarbilledet, således at der er en separat kalibreringsfaktor for hver pixel. Dette medfører at den radarestimerede totale dybde for hver pixel i billedet for kalibreringshændelsen er lig den gennemsnitlige dybde målt af de fem målere i Odense. Denne fremgangsmåde har den fordel, at radaren ikke systematisk undervurderer nedbøren i retninger, hvor radarens udsyn delvist er blokeret af træer eller lignende. Et dimensionsløst plot af kalibreringsbilledet ses på nedenstående figur.



Figur 6.5.2.d
Dimensionsløst plot af kalibreringsbilledet for Odense radaren.



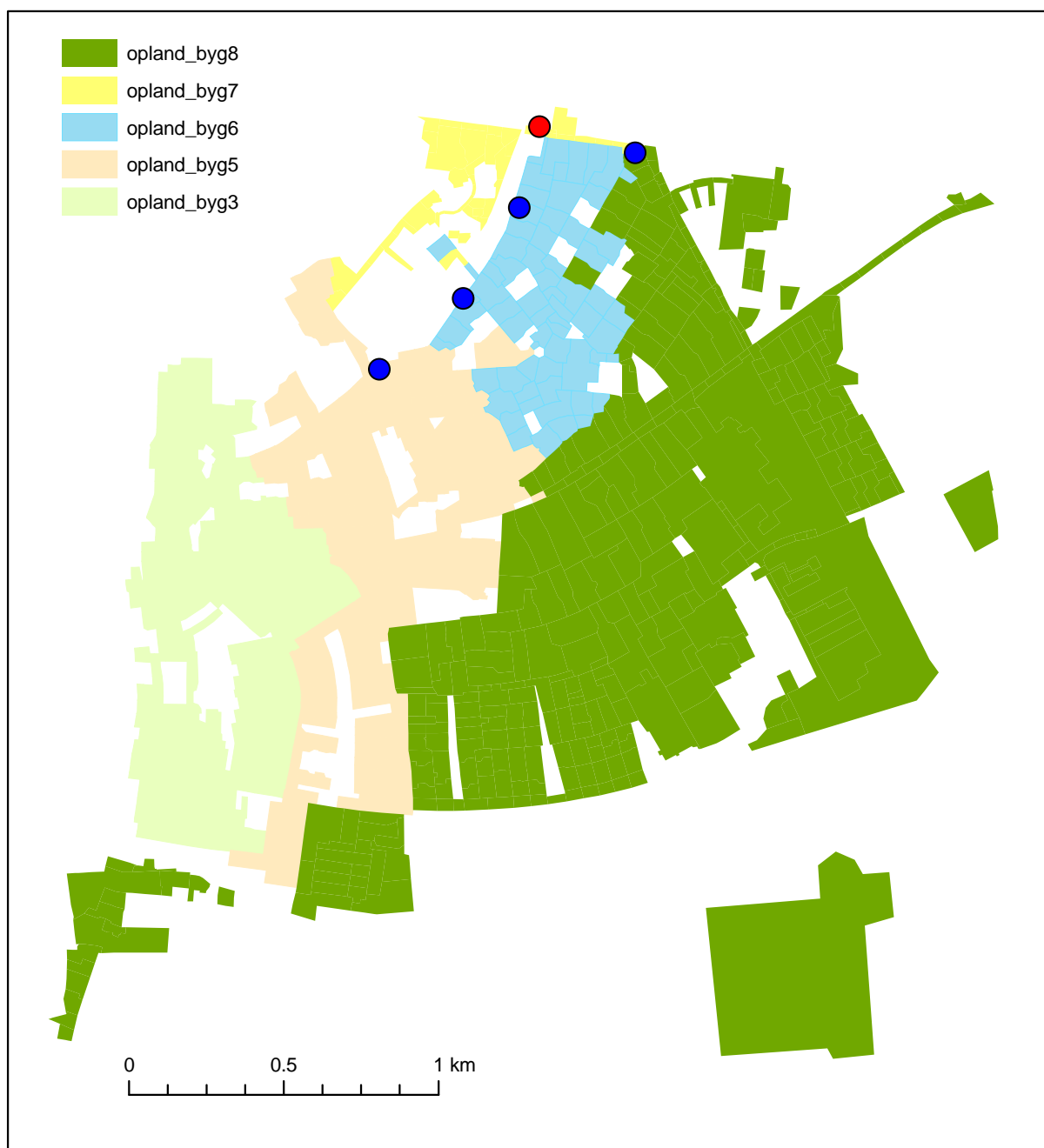
Figur 6.5.2.e
Odense - 7. september 2008 kl. 18.45 (Kort er fra Google Maps)

Det kan ses på det valgte resultateksempel for Odense, at nedbørsfeltet ændrer meget form i løbet af den viste time. Der er med andre ord udover en nord-nordøstlig advektion også et henfald af nedbøren. Da prognosemodellerne ikke tager højde for udvikling/henfald er en hændelse som den valgte svær at prognosticere korrekt. Dette er også tydeligt når man ser på evalueringsmålene, for eksempel er R^2 efter 30 min 0.33 for CO-TREC og 0.20 for GV. Dog kan de ses at det med CO-TREC er muligt af prognosticere nedbør i Odense Vest efter 30 min, hvilket svarer godt overens med observationerne og tilsvarende er der i Odense ikke observeret nedbør efter 60 min, hvilket også CO-TREC prognosen viser.

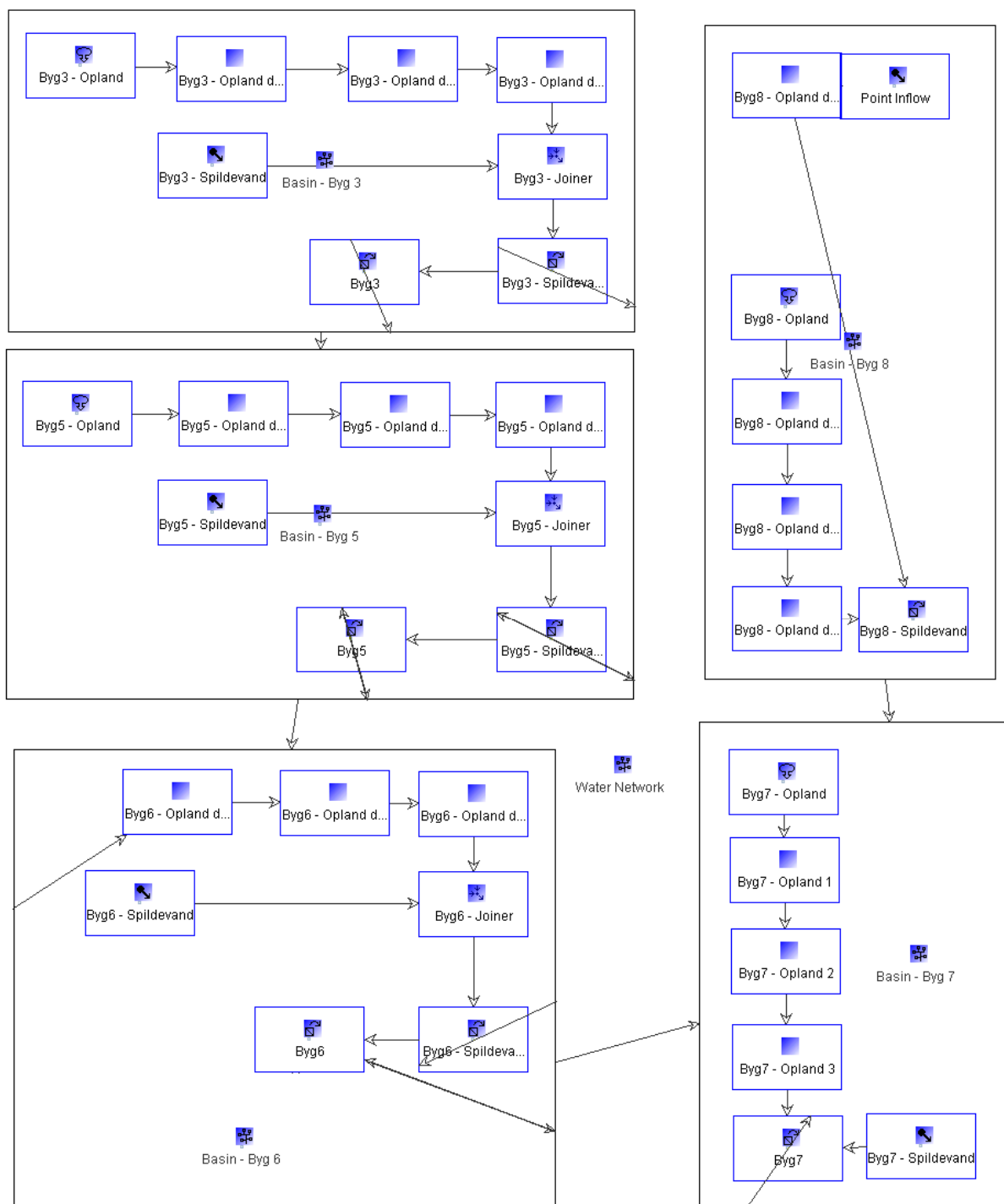
6.6.2

Opbygning af afstrømningsmodel og resultater

Odense modellen er bygget over de fem oplande der afstrømmer til Munkedammen. Disse kan ses på nedenstående figur. Da der er meget styring i Munkedammen er styringsstrategierne lagt ind som en del af modellen.



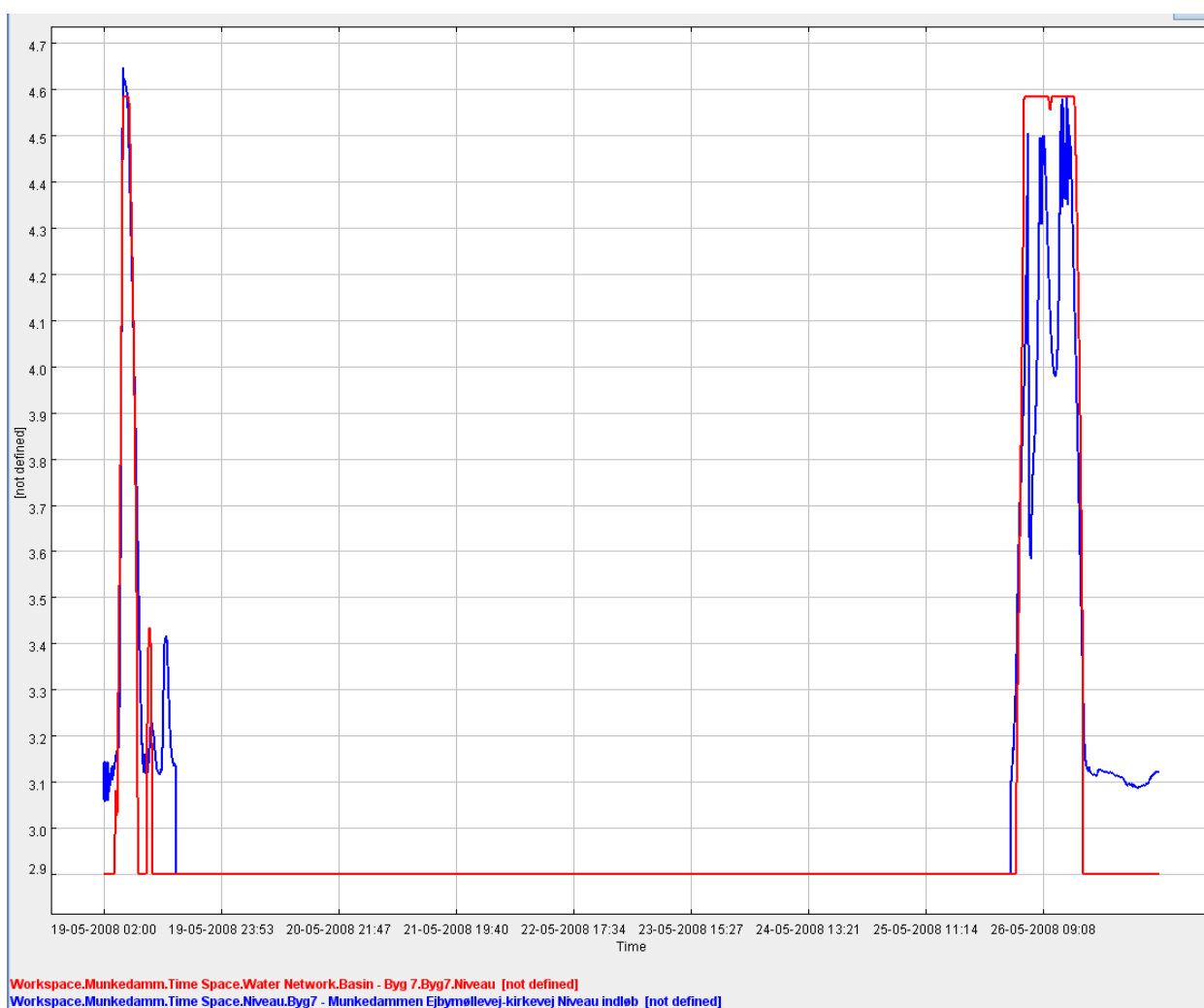
Figur 6.6.2.a
Oplande til Odense modellen med angivelse af prognosepunkt (rød) og øvrige kalibreringspunkter (blå).



Figur 6.6.2.b
WaterAspects modellen for Odense.

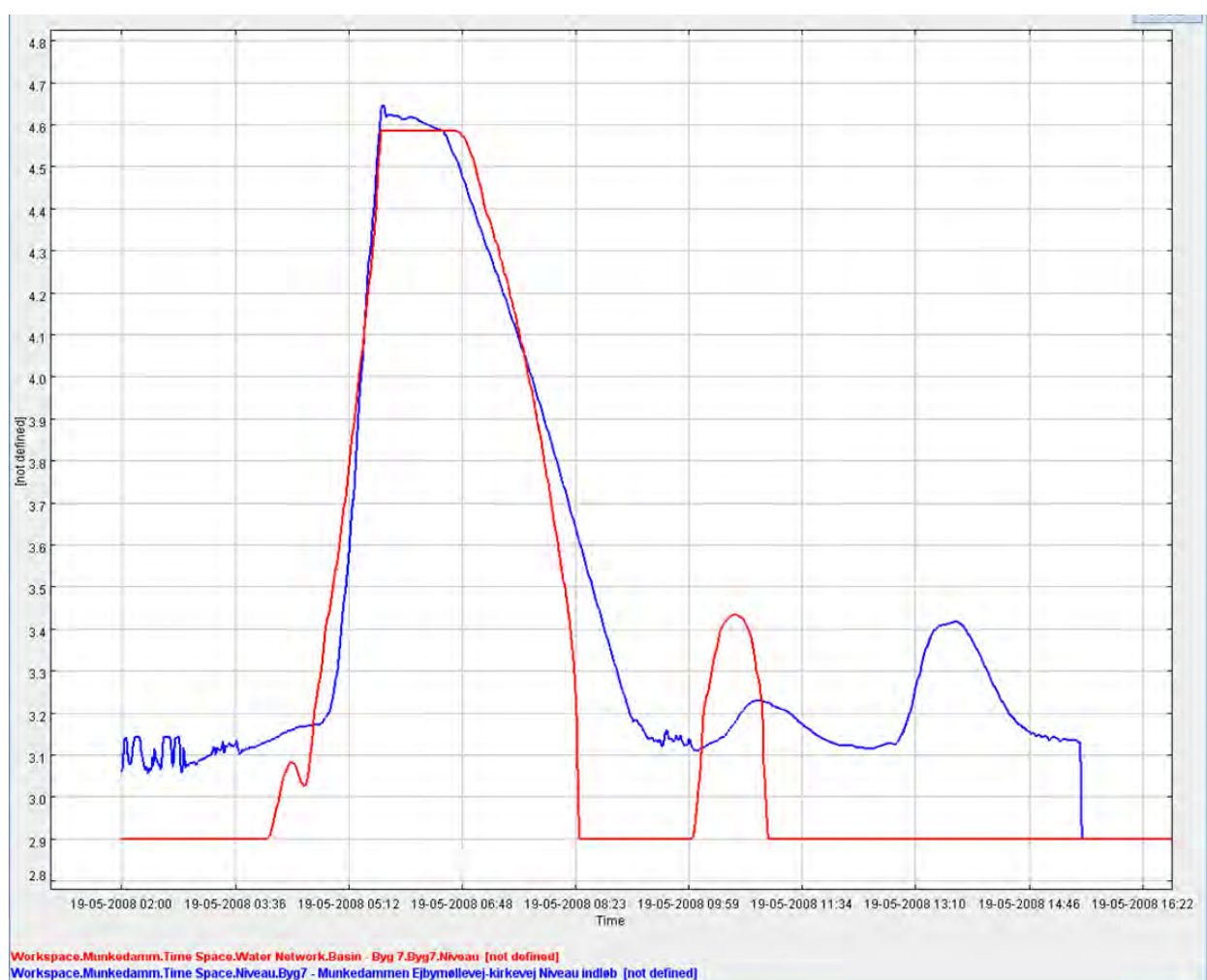
Kalibrering

Modellen er kalibreret ud fra niveau målinger i tre forskellige bygværker i Munkedammen bassinledning. Historiske data for såvel niveauer som status af spjæld i det enkelte bygværker i bassinledningen har været tilgængelige for kalibreringsperioden sidst i maj 2008. Figur 6.6.2.c viser de målte og modellerede niveauer fra den kalibrerede model for det bygværk, der er længst nedstrøms i ledningen. Figur 6.6.2.d viser et zoom ind på hændelsen d. 19/5 2008.



Figur 6.6.2.c

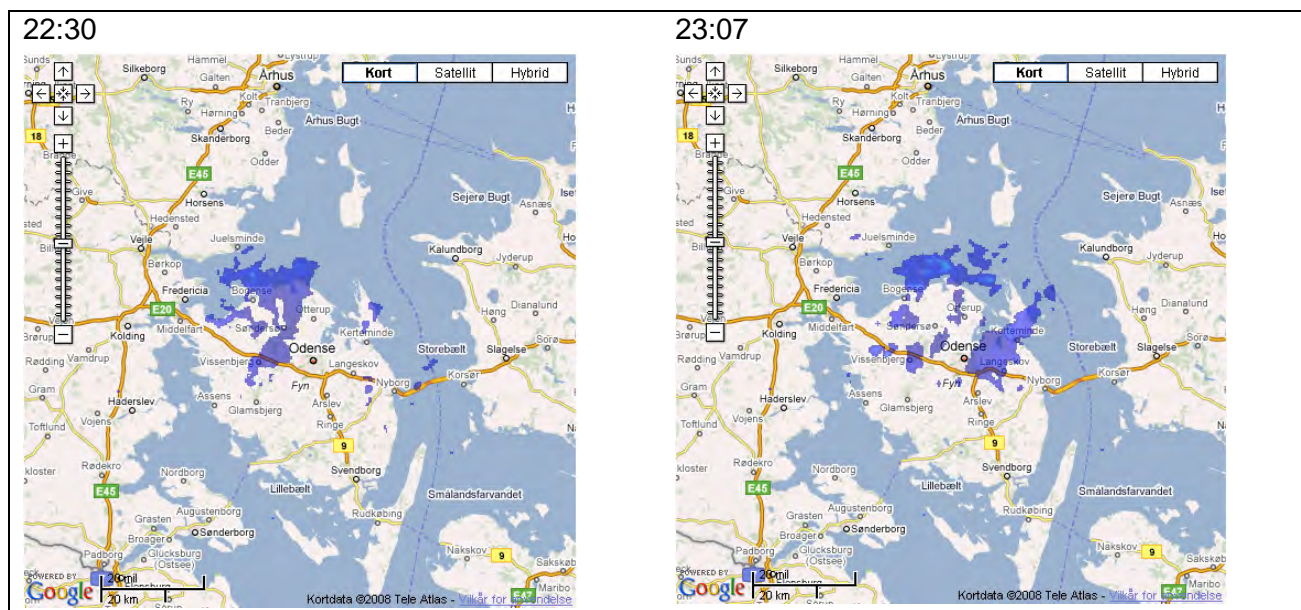
Målt og modelleret niveau i bygværk 7 i Munkedammen bassinledning. Den blå linje er det målte.



Figur 6.6.2.d
Zoom ind på hændelsen d. 19/5 2008.

Systemet i brug

I det følgende vises et eksempel på systemet i brug, hvor der vises radar-billeder til to forskellige på hinanden følgende tidspunkter, samt tilsvarende screendumps fra STAR brugerfladen.



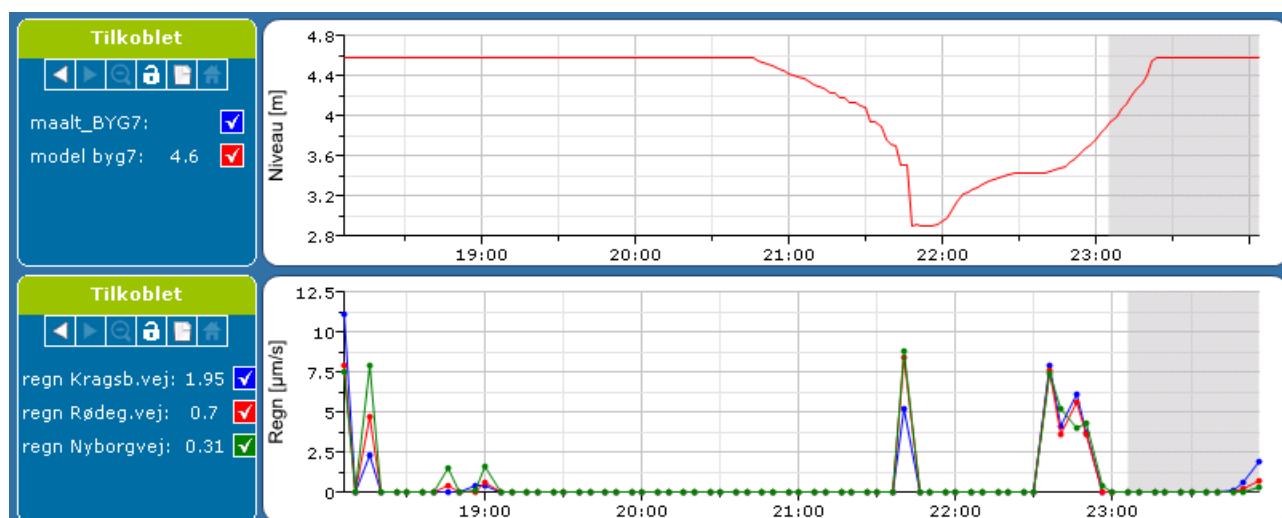
Figur 6.6.2.e
To radarbilleder fra Odense radaren med 35 minutter imellem.

22:31 – Radaren estimerer, at der kommer et nedbørsområde der er kraftigt og dybt nok til at bassinledningen bliver fyldt ca. klokken 23:15, se figur 6.6.2.f.



Figur 6.6.2.f
STAR brugerfladen fra klokken 22:30.

23:07 – Hændelsen forløb ca. som prognosticeret og bassinledningen er godt på vej til at blive fyldt. Radaren estimerer ikke at der er mere nedbør på vej umiddelbart, se figur 6.6.2.g.



Figur 6.6.2.g
STAR brugerfladen fra klokken 23:07.

6.6.3

Vurdering og perspektiver

Odense-radaren har været meget plaget af støj i periferien ca. 40-60 km fra radaren. Dette påvirker ikke målingerne over Odense by, men påvirker prognosen, da støjen prognosticeres ind over byen.

Desuden påvirker støjen korrelationsberegningen og dermed den globale flytningsvektor. For at undgå disse støjproblemer er der implementeret et afskæringsniveau, således radardata under dette niveau bortfiltreres.

Der er i projektperioden både forekommet konvektive og stratiforme nedbørshændelser og det vurderes at datagrundlaget har været tilfredsstillende til at vise både nøjagtige og mindre nøjagtige prognoser. Generelt vurderes det at prognoser inden for 30 min. er af tilfredsstillende kvalitet, men at prognoserne bliver mere usikre for prognosticering over 30 min.

Som tidligere beskrevet giver den opstillede prognose mulighed for optimering af styringen af spjældene i bassin-ledningen ved Munkedammen, hvilket kunne føre til en reduktion af aflastning til åen uden øget risiko for oversvømmelse i oplandet.

Odenses afløbssystem er indrettet med store bassinvoluminer, hvor der under regn tilbageholdes en blanding af spildevand og regnvand, for at undgå aflastning til de omgivende vandløb, å og havn. Der ligger et stort potentiale i at benytte en radarbaseret prognose til fyldning og tømning af bassinerne, så der i videst muligt omfang undgås aflastninger. Oplysningen om hvilke deloplande kan forventes at modtage den største mængde nedbør, kan også benyttes aktivt i beslutninger vedrørende hvilke bassiner bør tømmes først og hvilket renseanlæg det er mest hensigtsmæssigt at tømme bassinerne til på et givent tidspunkt.

7. Perspektiver for konceptet

Den udviklede metode gør det muligt at forudsige en vandføring eller vandstand et vilkårligt sted i afløbssystemet. Af hensyn til beregningstiden skal disse punkter fastlægges på forhånd og kalibreres mod måledata. Det gør at man kan forudsige f.eks. hvad tilløbet til renseanlægget vil være eller hvor høj vandstanden vil være i et bassin. Denne evne til i realtid at forudsige tilstande i afløbssystemet op til 2 timer før hændelsen optræder, gør det muligt at træffe bevidste valg omkring hvordan renseanlægget eller afløbssystemet skal styres. En oplagt mulighed er at bruge systemet i forbindelse med regnstyring på renseanlæg. Her kan man reducere mængden af aflastet vand til recipienten signifikant ved at starte styringssekvensen på baggrund af en tilstrømningsprognose. Lige så vigtigt, kan man afslutte styringssekvensen på det rigtige tidspunkt, når det kan ses at tilstrømningen vil aftage. Men også i forbindelse med samstyring, hvor overløb, spjæld, pumper indgår i en samlet strategi for optimering af driften af afløbssystemer, vil systemet være et vigtigt værktøj. Nogle komponenter i afløbssystemet kan styres direkte af systemet, mens andre dele skal styres som en kombination af prognose og online målinger i afløbssystemet.

Det beskrevne koncept er i sin nuværende udgave allerede nu klar til at bruge i en overvåget udgave på eksisterende afløbssystemer og renseanlæg. Den anvendelse der står nærmest er aktivering af regnstyring på renseanlæg. Systemet kan med få modifikationer forbindes direkte til renseanlæggenes SRO system.

Det er vigtigt at fremhæve at det ikke kun er ekstreme hændelser med potentiale for store oversvømmelser der er målet for dette projekt. Mindre og hyppige hændelser kan også bedre håndteres og dermed reducere den akkumulerede belastning på recipienter. Det er specielt interessant, hvis man f.eks. ønsker at reducere mængden af sygdomsfremkaldende bakterier i badevand. I disse situationer kan aflastninger måske helt undgås ved at omdirigere og opstuve vandet i strategiske områder afløbssystemet.

Det er også muligt at bruge systemet som beslutningsstøtte, når kraftige regnhændelse truer med at overbelaste byernes afløbssystemer. Selvom en styringsstrategi i sig selv ikke vil være nok til at undgå oversvømmelser eller alvorlige aflastninger, vil det være muligt at prioritere sin indsats. Er der områder der erfaringsmæssigt kræver indgreb eller overvågning af driftspersonale, kan dette igangsættes i god tid før hændelsen optræder.

Der kan også være at kritiske vandstande i afløbssystemet, der bliver registreret i SRO anlægget uden at der er nedbørsmæssig begrundelse for det.

Det kan resultere i at f.eks. overløb træder i funktion pga. af tilstopning eller andet. Her kan vedvarende forskelle mellem registrering og modellering bruges til at fejlfinde i afløbssystemet.

Systemets evne til at kontrollere sig selv rummer store perspektiver for at opnå god driftsikkerhed og pålidelighed. Når systemet kan holde sine prognoser op mod målinger med vejrradaren eller målinger i afløbssystemet er der muligt i fremtiden at optimere systemet løbende og dermed reducere de usikkerheder der er ved prognosen. Er prognosen usikker pga. specielle metrologiske forhold, kan systemet gå over til en sekundær og simplere styringsstrategi. Det er vigtigt at have en tilbagefaldsstrategi når systemet bringes til anvendelse.

Det udviklede system har potentiale til at blive en eksportsucces for danske miljøvirksomheder. De problemstillinger som systemet forsøger at løse er af generel karakter i verden. Flere lande står over for større klimaudfordringer end Danmark med hensyn til ekstrem regn. Det er derfor sandsynligt at Danske miljøvirksomheder kan eksportere den viden som er opnået gennem dette projekt.

Dette projekt skal ses i sammenhæng med de øvrige aktiviteter, som er under udvikling i Danmark. Der er større forskningsprogrammer, så som Storm and Wastewater Informatics (SWI), som søger at adressere forskningsmæssige perspektiver i anvendelse af f.eks. vejrradar til forbedret styring af afløbssystemer.

Dette projekt udgør et fremragende supplement til SWI, idet vi i dette projekt har søgt at implementere eksisterende viden til et fungerende system. Hvor SWI projektet primært er et forskningsprojekt er dette projekt primært et demonstrationsprojekt, der skal vise hvad der er muligt med eksisterende teknologi. SWI projektet vil forsætte de næste 4 år og der vil være store perspektiver i at have et fase 2 af nærværende projekt, hvor forskningsresultaterne opnået i andre projekter kan implementeres og demonstreres.

Der er også en udvikling i gang med at etablere et netværk af lokale vejrradarer, hvor spildevandskomiteens vejrradarudvalg spiller en rolle. Inspirationen er fra Spildevandskomiteens regnmålnetværk, der gennem de sidste 20-30 år har vist vigtigheden af måling af nedbør. Vores nuværende standarder for håndtering af regnvand er i høj grad baseret på regnmålnetværket. Det er håbet at et lokalt vejrradar netværk kan spille en tilsvarende rolle i fremtiden. Nærværende projekt vil netop være med til at understøtte en sådan udvikling, hvor data fra lokale vejrradarer indgår i en mere aktiv strategi for vore spildevandssystemer.

8. Konklusion

By og Landskabsstyrelsen ønskede i 2007 at Danske miljøvirksomheder og forskningsinstitutioner ville gå sammen og finde løsninger på at måle og håndtere de ekstreme regnhændelser, som med stigende hyppighed belaster vore byer.

5 forsyningsvirksomheder er gået sammen med Aalborg Universitet og Krüger AS for at demonstrere at det med tilgængelig teknologi er muligt at skabe den nødvendige infrastruktur til at gøre vores spildevandstekniske systemer mere intelligente.

Det gennemførte projekt har etableret et system der gør vejrradarbaseret styring af spildevandssystemer mulig. Som noget helt specielt er det lykket at etablere et system, der forudsiger intensitetens stedlige og tidslige fordeling og den efterfølgende afstrømning i udvalgte oplande – alt sammen i realtid. Det har været projektets ambition at i så stort omfang som mulig at gennemføre forudsigelser på regn og afstrømning mens de sker. Prognoser holdes op mod målinger løbende for at vurdere prognosens kvalitet. Kun på den måde kan man bevise at teknologien er operativ.

På baggrund af 4 lokale radarer og én DMI radar er der med succes etableret en infrastruktur, hvor mange radarer og computere udveksler oplysninger om nedbør og afstrømning. Systemet opbygget som et parallelt system, hvor hver prognose til forsyningsvirksomhederne er uafhængig af hinanden. På den måde er der opbygget en meget stor robusthed i den måde prognoserne er genereret. Systemerne kan distribueres decentralt, således at strømafbrydelser eller internetafbrydelser ikke påvirker driften. Alle resultater er offentligt tilgængelige gennem 3 online websides.

Der var i ansøgningen formuleret tre forventede resultater fra projektet:

- En vejrradarbaseret prognose model til forudsigelse af stedlig fordelt ekstrem nedbør over byer med en horisont på ½-2 timer.
- En enkel, hurtig og robust routing model med kobling af nedbør og afstrømning til forudsigelse af flow i afløbssystemer og af hydraulisk belastning af renseanlæg.
- Et online kvalitetssikringssystem til vurdering af prognosens sikkerhed.

Alle disse resultater er opnået.

Det fulde potentiale af systemet er imidlertid endnu ikke helt afdækket. Systemet er udviklet til at forudsige og analysere kraftige regnhændelser af konvektiv karakter. Da systemet først for nogle af de 5 cases vedkommende kom online sent i efteråret har det ikke været muligt at afprøve det på disse kraftige sommerhændelser.

Den frembragte løsning er på verdensplan unik, idet der meget få steder er brugt realtidsforudsigelser af afstrømning i afløbssystemer og ingen steder er der brugt et så massivt antal radarer af forskellige typer. Resultaterne er klart tilfredsstillende, men viser også klart at der er mulighed for at forbedre prognosesystemet - både for vejrradarprognosen og afstrømningsmodellen

9. Visioner for fase 2 til radarprojektet

Der har i spildevandsbranchen de seneste 10-15 år været en udtrykt interesse for samstyring af afløbssystem og renseanlæg, og de seneste år har ønsket om at anvende radar i samstyringstrategien også været til stede. Dette projekt har vist at det rent teknisk kan lade sig gøre at etablere et realtids system hvor radar anvendes i kombination med afstrømningsmodellen til at forudsige den hydrauliske belastning af spildevandssystemet. Før denne prototype af prognosesystemet kan anvendes direkte i styringsstrategier hos forsyningsselskaber, skal der dog udvikles yderligere på konceptet. Prognosen for flow, som er outputtet fra systemet, tænkes anvendt i styringsstrategier i afløbssystem og renseanlæg. I styring af de komplicerede spildevandssystemer vil en fejlagtig eller upræcis prognose kunne gøre mere skade end gavn, og det findes således nødvendigt med en yderligere udvikling af metoderne. I en opfølgende fase på projektet bør der derfor være fokus på:

- Udvidet data kvalitetskontrol for radardata og online signaler fra afløbssystem/reseanlæg.
- Udvikling af løbende og automatisk kalibrering af radarmodel og afløbsmodel.
- Anvendelse af online opkobling til DMI c-bånds radar.
- Udvikling af koncept for tilbagefaldsstrategier hvis radar-data ikke lever op til kvalitetskontrollen.

Interessen for radarprojektet har været stor i hele spildevandsbranchen, og projektdeltagerne har flere gange præsenteret projektet på møder, seminarer, m.v.. Ligeledes planlægges publicering af artikler til fagtidsskrifter efter projektafslutningen. Opmærksomheden på projektet har gjort at vi står med flere forsyningsselskaber og samarbejdspartnere som med fordel ville kunne inddrages i det videre arbejde med radar baseret styring.

Krüger A/S og Aalborg Universitet har besluttet sig for at arbejde videre med anvendelse af radar til styring, og det planlægges at gennemføre en fase 2 på projektet i 2009. I skrivende stund bliver der arbejdet med at opstille konceptet for fase 2, samt at finde ud af hvem der skal deltage. Der arbejdes ud fra en bruttoliste med 16 forsyningsselskaber.

10.

Litteratur

Einfalt, T., Arnbjerg-Nielsen, K., Faure, D., Jensen, N.-E., Quirmbach, M., Vaes, G., Vieux, B.E., Golz, C., 2004, Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage. J. Hydrol. 299 (3–4), 186– 202

DHI, 2008, Billede fra <http://www.regn.dk>

DMI, 2008, Billede taget af Søren Overgaard, Dansk Meteorologisk Institut

Grum, M. , Neergaard Jacobsen, B. , Nørremark, J. and Thyme, J. (2005). Hydrological Modelling in Identifying the Unintended Rainfall-Runoff Contributions. International Conference of Urban Drainage, Copenhagen 2005.

Grum, M., Longin, E. and Linde, J. J. (2006). A Flexible and Extensible Open Source Tool for Urban Drainage Modelling: www.WaterAspects.org. Conference on Urban Drainage Modelling, Dresden 2006.

Li, L., Schmid, W., Joss, J., 1995. Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. J. Appl. Meteorol. 34, 1286– 1300.


Liu, D., 2008, Nowcasting of precipitation with an X-band Local Area Weather Radar, Working paper Aalborg University, Department of Civil Engineering

Mecklenburg S, Joss J, Schmid W., 2000, Improving the nowcasting of precipitation in an Alpine region with an enhanced radar echo tracking algorithm. J Hydrol 239: 46–68.

Overgaard, S., 2004, The VRIS format of weather radar data, Internt Notat, Dansk Meteorologisk Institut

Rinehart, R.E., Garvey, E.T., 1978. Three-dimensional storm motion detection by conventional weather radar. Nature 273, 287– 289.

Van Horne, M.P., 2003. Short-term precipitation nowcasting for composite radar rainfall fields. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology.



Miljøministeriet
By- og Landskabsstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

Telefon 72 54 47 00
blst@blst.dk
www.blst.dk